

Studiengang: Kartographie und Geomedientechnik

Wintersemester: 2013/2014

**B A C H E L O R A R B E I T**

Erfassung von Verkehrsdaten aus monotemporalen Satellitenbilddaufnahmen

Analysis of traffic parameters in monotemporal satellite images

von

Sarah, Bräuninger

20.12.2013

Betreuer: Prof. Dr. Reiner Buzin (FH München)

Thomas Krauß (DLR)

Rolf Stätter (DLR)

Die Arbeit wurde angefertigt am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR).

# **BACHELORARBEIT**

Erfassung von Verkehrsdaten aus monotemporalen Satellitenbilddaufnahmen

Analysis of traffic parameters in monotemporal satellite images

von

Sarah, Bräuninger

20.12.2013

Betreuer: Prof. Dr. Reiner Buzin (FH München)

Thomas Krauß (DLR)

Rolf Stätter (DLR)

Die Arbeit wurde angefertigt am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR).

---

## Kurzfassung

---

Angesichts der steigenden Verkehrsbelastung auf den Straßen, welche mittlerweile auch in Schwellen- und Entwicklungsländern zu verzeichnen ist, besteht Handlungsbedarf zu einer besseren Verkehrsüberwachung und -steuerung. Zur Optimierung der Verkehrsabläufe und zur optimalen Ausnutzung bestehender Kapazitäten werden intelligente Verfahren zur Verkehrsplanung und -regelung benötigt. Da die Datenerfassung mithilfe von Induktionsschleifen und Verkehrsdichtemessungen nicht flächendeckend erfolgen kann, verlangt dies nach einer alternativen Methode. Optische Satellitenbilder nehmen hierbei zunehmend eine zentrale Rolle ein.

Diese Arbeit bezieht sich auf die Erfassung von Verkehrsparametern mithilfe von optischen Satellitenbilddaufnahmen des WorldView-2-Satelliten. Es werden ferner die Voraussetzungen für die Realisierung der Verkehrsdatenerfassung aus nur einer WorldView-2-Aufnahme geschaffen. Um dies zu ermöglichen, wird die Zeitdifferenz gemessen, die während der Aufnahme eines Satellitenbildes durch die zeitlich versetzte Aufnahme der drei Zeilen des Pushbroom-Scanners entsteht.

Zur Kalibrierung werden Stereobilder der Testgebiete München und London verwendet. Innerhalb der Satellitenbilder werden Fahrzeuge manuell erfasst und über deren zurückgelegte Wegstrecke innerhalb der Aufnahmen zwischen den drei Zeilen erfolgt die Kalibrierung der Zeitdifferenz.

Mithilfe des berechneten zeitlichen Versatzes, der innerhalb jeder WorldView-2-Aufnahme vorkommt, werden aus den manuellen Messungen einer optischen Satellitenaufnahme von München die Fahrzeuggeschwindigkeiten berechnet. Unter deren Verwendung erfolgt abschließend die kartographische Aufbereitung der Daten zu einer Verkehrsfluss- und einer Geschwindigkeitskarte.

---

Inhaltsverzeichnis

---

Kurzfassung.....	III
Inhaltsverzeichnis.....	IV
Abbildungsverzeichnis.....	VI
Tabellenverzeichnis.....	VIII
1 Überblick.....	1
1.1 Motivation .....	1
1.2 Zielsetzung .....	3
1.3 Aufbau der Arbeit.....	4
1.4 Verwandte Arbeiten .....	5
1.5 Zusammenfassung verwandter Arbeiten .....	13
2 Fernerkundungssysteme.....	15
2.1 Fernerkundungssatelliten – aktuelle Entwicklungen.....	15
2.2 Pushbroom-Scanner.....	16
2.3 WorldView-2.....	17
3 Datengrundlage .....	26
3.1 München .....	26
3.2 London.....	32
4 Datenaufbereitung .....	36
4.1 Orthorektifizierung .....	36
4.2 Bearbeitung der Testgebiete in XDibias .....	36
4.3 Aufbereitung der Satellitenbildszenen München und London.....	38
5 Kalibrierung .....	40
5.1 Manuelle Fahrzeugerkennung.....	41
5.2 Ableitung von Verkehrsparametern .....	43
5.3 Fehlerberechnung .....	48
6 Kartographische Visualisierung.....	51

6.1	Fahrzeugmessung und Geschwindigkeitsberechnung.....	51
6.2	Verkehrsflusskarte.....	52
6.3	Geschwindigkeitskarte .....	56
6.4	Farbwahl.....	56
6.5	Vergleich mit ADAC.....	62
7	Grenzen der manuellen Messung.....	64
8	Zusammenfassung.....	66
9	Ausblick .....	67
	Literaturverzeichnis.....	IX
	Anhang.....	XII
	Danksagung.....	XVII

---

Abbildungsverzeichnis

---

Abb. 1-1: Aufnahmeprinzip QuickBird-2 (Tao & Yu, 2011).....	7
Abb. 1-2: Aufbau der WV-2-Brennebene (Kääb, 2011) .....	9
Abb. 1-3: Band-zu-Band Registrierung (Smiley, 2011).....	10
Abb. 1-4: Schematische Darstellung der Brennebene des WV-2 (Smiley, 2011).....	11
Abb. 1-5: RapidEye-Aufnahme vom 08.04.2011 mit zeitlichem Versatz zwischen den Kanälen Rot, Grün und Blau .....	12
Abb. 2-1: Echtfarbendarstellung von Fahrzeugen in WV-2-Aufnahme (Kanäle: Blau, Grün, Rot, alle auf dem MS1-Array).....	16
Abb. 2-2: Darstellung von Fahrzeugen in WV-2-Aufnahme (Kanäle: Rot, Rot, Gelb, Kombination aus MS1- und MS2-Array).....	16
Abb. 2-3: WorldView-2 TLE Datensatz vom 07.12.2012 (Infosatellites, 2012) .....	18
Abb. 2-4: WorldView-2 modifizierter TLE Datensatz vom 07.12.2012.....	18
Abb. 2-5: Definition der TLE (Kauderer, 2011) .....	19
Abb. 2-6: WV-2 Echtzeitverfolgung vom 10.11.2013 um 16:06 GMT (n2yo, 2013).....	22
Abb. 2-7: Spektralbereiche des WV-2-Satelliten im Vergleich zu Quickbird (ESA, 2013).....	24
Abb. 2-8: Aufbau der Brennebene des WV-2 Satelliten (eigene Grafik, basiert auf Daten von DigitalGlobe (2010)) .....	25
Abb. 2-9: Spektrale Empfindlichkeit des WV-2-Satelliten (DigitalGlobe, 2010) .....	25
Abb. 3-1: Abdeckungen der einzelnen München-Szenen (GoogleMaps, 2013).....	28
Abb. 3-2: Überlagerung der drei München-Szenen: RGB = rot (MS1), grün (MS2), blau (MS3) .....	29
Abb. 3-3: Aufnahmerichtungen der München-Szenen.....	30
Abb. 3-4: Scanrichtungen der München-Szenen.....	31
Abb. 3-5: Abdeckung der Satellitenbilder von London (GoogleMaps, 2013) .....	32
Abb. 3-6: Aufnahmerichtungen der London-Szenen .....	33
Abb. 3-7: Scanrichtung der London-Szenen .....	34
Abb. 3-8: Darstellung der Scene-Azimuth- und Scene-Incidence-Winkel der Satellitenbildszenen von München und London .....	35
Abb. 4-1: Manuelle Fahrzeugerkennung im XDibias Side-By-Side-Modus.....	37
Abb. 4-2: Zusammenhang zwischen UTM- und Bildkoordinatensystem .....	38

Abb. 5-1: Aufbau einer _cpdb-Datei (correlation point database) .....	42
Abb. 6-1: Alle gemessenen Fahrzeuge des MS1-Bildes von München .....	51
Abb. 6-2: Auszug aus der Excel-Tabelle mit den mittleren Geschwindigkeiten .....	53
Abb. 6-3: Legende der Verkehrsflusskarte von München.....	55
Abb. 6-4: Legende der Geschwindigkeitskarte von München .....	57
Abb. 6-5: Darstellung der Fahrzeuggeschwindigkeiten durch Pfeilsignaturen .....	57
Abb. 6-6: Darstellung der Richtungsfehler, die sich durch die Pfeilsignatur ergeben .....	58
Abb. 6-7: Darstellung der Fahrzeuggeschwindigkeiten durch Kreissignatur Kreuzung A99 Dachauerstraße in München-Nord.....	59
Abb. 6-8: Fahrzeuggeschwindigkeiten vor und nach dem Allacher Tunnel .....	59
Abb. 6-9: Fahrzeuggeschwindigkeiten innerhalb des Ausschnitts Autobahnkreuz A99 mit A8.....	60
Abb. 6-10: Fahrzeuggeschwindigkeiten auf der A96 in Richtung Ausfahrt Garmischer Straße .....	61
Abb. 6-11: Zu erwartende Verkehrslage am 14.07.2014 um 12:30 Uhr MESZ (ADAC, 2013).....	63
Abb. 6-12: Legende der zu erwartenden Verkehrslage am 14.07.2014 um 12:30 Uhr MESZ (ADAC, 2013).....	63
Abb. 7-1: Fahrzeugreflexionen in 1r und 1g interpolierte Darstellung .....	64
Abb. 7-2: Fahrzeug mittig auf einer Kreuzung.....	65
Abb. 7-3: Fahrbahnverdeckung durch Bäume.....	65
Abb. 9-1: Differenzbild bewegte Objekte in der MS1-WV-Aufnahme (persönliches Gespräch mit Herrn Krauß (2013)).....	67
Abb. 9-2: Fahrzeugmarkierungen des automatischen Detektors innerhalb der MS1-WV-Aufnahme im Vergleich zu den manuellen Messungen nach Abb. 6-1 (Krauß, persönliches Gespräch (2013)) .....	68

---

 Tabellenverzeichnis
 

---

Tab. 1-1:	Genauigkeiten der Band-zu-Band-Registrierung (Smiley, 2011) .....	10
Tab. 1-2:	Vergleich der Zeitdifferenzen verwandter Arbeiten .....	13
Tab. 2-1:	Vergleich der Auflösungen verschiedener Satelliten (ESA, 2013).....	15
Tab. 2-2:	TLE Erläuterung 1. Zeile .....	19
Tab. 2-3:	TLE Erläuterung 2. Zeile .....	20
Tab. 2-4:	Bahndaten des WV-2 .....	21
Tab. 2-5:	Kanäle des WV-2 (DigitalGlobe (2010)), siehe auch Abb. 2-9 .....	23
Tab. 3-1:	Abdeckung der Satellitenbilder von München, siehe auch Abb. 3-1 .....	27
Tab. 3-2:	Aufnahmedaten der München-Szenen .....	29
Tab. 3-3:	Abdeckung der Satellitenbilder von London .....	32
Tab. 3-4:	Aufnahmedaten der London-Szenen .....	33
Tab. 4-1:	Optimierte Abdeckung der Satellitenbilder von München .....	39
Tab. 4-2:	Optimierte Abdeckung der Satellitenbilder von London .....	39
Tab. 5-1:	Kanalkombinationen der Vergleichsmessungen um den Zeitversatz innerhalb der MS-Arrays auszuschließen .....	40
Tab. 5-2:	First Line Time der MS-Bilder der Testgebiete München und London .....	45
Tab. 5-3:	Ergebnisse zur Kalibrierung der Zeitdifferenz $\Delta t$ zwischen dem MS1- und MS2-Array .....	47
Tab. 5-4:	Empirische Standardabweichungen der Testgebiete.....	48
Tab. 5-5:	Ergebnisse zur Kalibrierung der Zeitdifferenz $\Delta t$ zwischen den MS1-, PAN- und MS2-Arrays.....	50
Tab. 0-1:	Messungen von Bild 1r nach 3g und Bestimmung der Verkehrsparameter .....	XIII
Tab. 0-2:	Messungen von Bild 1r nach 1g und Bestimmung der zurückgelegten Strecken.....	XIV
Tab. 0-3:	Mittelwertbildung der Strecken innerhalb der Bilder und Auswertung der Messungen mit Mittelwertbildung von $\Delta t$ .....	XV
Tab. 0-4:	Ermittlung der Standardabweichung anhand von zwei Messreihen.....	XVI



---

## 1 Überblick

---

### 1.1 Motivation

Verkehr bildet in der heutigen Gesellschaft eine wichtige Voraussetzung für unsere Lebensqualität. Er realisiert den Austausch von Gütern und verbindet Menschen und Länder (Hütter, 2013). Als beliebtestes Verkehrsmittel gilt das Automobil, es spielt im alltäglichen Leben eine zentrale Rolle und zählt als Freiheits- und Kulturgut (Stadler, 2011). Innerhalb der letzten Jahrzehnte wuchs das Verkehrsaufkommen immer weiter. In Deutschland war zwischen 2004 und 2010 ein Anstieg von 2,9 % an Beförderungsleistungen, welches das Produkt aus beförderten Personen und deren zurückgelegten Kilometern [Pkm] darstellt, im Personenverkehr zu verzeichnen. Im EU-Vergleich liegt Deutschland damit über dem Durchschnitt, das heißt die Deutschen greifen häufiger auf den PKW als Verkehrsmittel zurück als andere EU-Länder. „Mehr als die Hälfte aller Wege und mehr als drei Viertel der Beförderungsleistung entfielen 2010 auf den motorisierten Individualverkehr (MIV) mit dem Pkw oder einem motorisierten Zweirad“ (Hütter, 2013).

In Deutschland sind zu knappe Budgets der öffentlichen Haushalte für einen hohen Investitionsrückstand verantwortlich. Die Mittel reichen nicht mehr um die vorhandene Verkehrsinfrastruktur zu erhalten oder zu erweitern. Die Auswirkungen dieser Unterfinanzierung werden in Zukunft durch Vermehrung von Baustellen, Einengungen, Umleitungen und Geschwindigkeitsbegrenzungen die Fahrqualität und Sicherheit auf den Straßen erheblich beeinträchtigen (Ahrens, 2011). Aus diesen Gründen ist eine Optimierung des bestehenden Verkehrsnetzes notwendig. Angesichts der steigenden Verkehrsbelastungen bleibt die Verkehrssteuerung und -beeinflussung durch den Aufbau automatischer Anlagen weiterhin ein verkehrspolitischer Schwerpunkt der Bundesregierung. Das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung plant zur Unterstützung der traditionellen Verkehrsinfrastrukturplanung den Einsatz von Verkehrstelematiksystemen. Telematik verbindet Telekommunikation und Informatik. Es ist ein Mittel zur Informationsverknüpfung von mehreren Informationssystemen und nutzt dazu sowohl Telekommunikationssysteme als auch spezielle Datenverarbeitung. Die zweckmäßige Verwendung von Telematik auf dem Verkehrssektor soll zur Steigerung der Effizi-

enz der Verkehrsabläufe, Erhöhung der Verkehrssicherheit, Verringerung der Umweltbelastungen und Optimierung betrieblicher Abläufe dienen (Boltze, et al., 2005). Die Verfügbarkeit an genauen und aktuellen Verkehrsdaten ist dafür zwingend notwendig. Als primäre Quellen dienen Polizei-, Verkehrszentraleninformationen und Induktionsschleifen zur Verkehrsdichtemessung. Letztere bieten eine hohe räumliche und zeitliche Auflösung, jedoch ist deren geographische Ausdehnung äußerst gering und die punktuell durchgeführten Messungen liefern keine Informationen über den linienhaften bzw. flächenhaften Verkehr. Zur flächigen Verkehrsdatenerfassung bietet die Fernerkundung eine große Auswahl an Möglichkeiten. Häufig werden Luftbilder verwendet, doch durch ihre unzureichende räumliche Abdeckung werden sie in dieser Arbeit nicht in Betracht gezogen. Optische Satellitenbildaufnahmen hingegen erfassen großflächige Gebiete und liefern einen hochauflösten Schnappschuss zur aktuellen Verkehrssituation eines Zeitpunktes, z.B. über ein ganzes Stadtgebiet. Die Fläche, die durch ein Satellitenbild abgedeckt werden kann ist mindestens fünfmal so groß wie die eines Luftbildes und bietet somit die Möglichkeit, das innerstädtische Verkehrsgeschehen zu einer bestimmten Zeit zu beobachten. Aus den Bildern können die Fahrzeuganzahl und -position gemessen werden und damit die Verkehrsdichte, der Verkehrsfluss und die aktuelle Geschwindigkeit der einzelnen Fahrzeuge bestimmt werden. Um die momentanen Geschwindigkeiten der Fahrzeuge zum Aufnahmezeitpunkt der Satellitenbildaufnahme ableiten zu können sind eigentlich zwei Bilder notwendig. In dieser Arbeit wird jedoch eine Besonderheit der Sensorgeometrie eines Pushbroom-Scanners ausgenutzt. Diese Sensoren sind bei fast allen hochauflösenden Satelliten üblich. Verwenden diese mehrere Zeilen, mit einer Zeitdifferenz  $\Delta t$  zwischen den Arrays kann daraus die Geschwindigkeit bewegter Objekte abgeleitet werden. Der Zusammenhang zwischen Geschwindigkeiten und Zeitdifferenz  $\Delta t$  wird im folgenden Kapitel näher erläutert.

## 1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die exakte Rekonstruktion der Aufnahmegeometrie des WorldView-2 (WV-2) Kamerasystems um durch diese einmalige Kalibrierung die Möglichkeit zu schaffen, aus einzelnen Satellitenbildern die Bewegung von Objekten abzuleiten. Damit ist sowohl die geometrische Anordnung der Arrays als auch die daraus resultierende zeitliche Differenz während der Aufnahme gemeint. Aufgrund der Anordnung der drei Arrays in der Brennebene (focal plane) des Sensors erfolgt die Erfassung eines Geländepunktes asynchron durch die drei Zeilen. Das heißt, innerhalb einer WorldView-2-Aufnahme wird ein bewegtes Objekt an drei verschiedenen Positionen aufgenommen, ein statisches Objekt bleibt dabei auf dem gleichen Standort. Bezüglich dieser Aufnahmetechnik ergibt sich innerhalb einer monotemporalen Satellitenbildaufnahme eine Zeitdifferenz zwischen den Aufnahmen der drei Arrays, mit deren Hilfe es möglich ist, den Versatz von bewegten Objekten und daraus ihre resultierende Geschwindigkeit zu bestimmen.

Diese Zeitdifferenz  $\Delta t$  ist für WV-2 noch nicht bekannt. Diese Kalibrierung ist somit ein Hauptbestandteil dieser Arbeit. Da die zurückgelegte Strecke von der Zeitdifferenz abhängt, kann durch Messung der Positionsänderung der Fahrzeuge auf die Geschwindigkeit und den Zeitversatz geschlossen werden. Für die Messungen werden jeweils drei optische WV-2 Satellitenbild-Szenen des gleichen Gebietes verwendet. Es wird das Münchner und das Londoner Stadtgebiet untersucht. Die Aufnahmezeitpunkte der einzelnen Satellitenbilder sind bekannt, die Markierungen der Fahrzeuge erfolgen manuell.

Die Bedeutung der gewonnenen Zeitdifferenz  $\Delta t$  wird anschließend an zwei möglichen Anwendungen zur Gewinnung von Verkehrsinformationen aufgezeigt. Dabei handelt es sich um zwei Verkehrskarten, die aus einer Satellitenbildaufnahme des Stadtgebiet Münchens abgeleitet werden. Von allen wichtigen Münchner Verkehrsadern sind sowohl die momentanen Geschwindigkeiten der Fahrzeuge als auch der Verkehrsfluss zum Aufnahmezeitpunkt des Satellitenbildes visualisiert worden. Abschließend erfolgt ein Vergleich mit einer entsprechenden Verkehrsflusskarte des ADAC.

### 1.3 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit ist im Wesentlichen in einen theoretischen Teil und einen praktischen Teil untergliedert.

Im theoretischen Teil erfolgt die Hinführung zum Thema und Beschreibung relevanter Themen, die zum Verständnis der Kalibriermethode für  $\Delta t$  notwendig sind. Einleitend dazu findet eine Darlegung verwandter Arbeiten statt, die den aktuellen Stand bezüglich der Bestimmung der Zeitdifferenz  $\Delta t$  während der Datenaufnahme aufzeigen.

Im zweiten Kapitel wird über die Entwicklung von Fernerkundungssatelliten und deren geometrische Auflösungen berichtet. Dazu erfolgt die ausführliche Beschreibung eines Pushbroom-Scanners und des WorldView-2-Satelliten. Dabei wird die durch den Pushbroom-Scanner bedingte Aufnahmetechnik mit zeitlichem Versatz erörtert. Zur Ermittlung dieser Zeitdifferenz werden WV-2-Aufnahmen benötigt, deren Vorstellung im dritten Kapitel stattfindet. Die zur Kalibrierung notwendigen Untersuchungsgebiete werden beschrieben und im nächsten Abschnitt (Kapitel 4) erfolgt die Datenaufbereitung der Testgebiete für die Kalibrierung. Diese wird mithilfe manueller Fahrzeugerkennung und daraus ermittelten Verkehrsparametern durchgeführt. Die Methode und Darlegung der Ergebnisse wird in Kapitel 5 ausführlich geschildert. Im Anschluss erfolgt unter Benutzung der kalibrierten Zeitdifferenz die kartographische Visualisierung der Fahrzeugmessungen und Geschwindigkeitsberechnungen in Kapitel 6. Anschließend werden die Grenzen des Verfahrens aufgezeigt (Kapitel 7) und in Kapitel 8 erfolgt eine Zusammenfassung der im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Kenntnisse. Ein möglicher Ansatz zur Fortführung der Erfassung von Verkehrsdaten aus monotemporalen WV-2-Aufnahmen mittels automatischer Detektion wird im letzten Kapitel 9 in Ausblick gestellt.

#### 1.4 Verwandte Arbeiten

Fernerkundung behauptet sich als eine vielversprechende Wissenschaft zur Erfassung von Verkehrsdaten, zur Verkehrsplanung und -überwachung. Es gibt eine Reihe an Fernerkundungsmethoden zur Gewinnung von solchen Daten, sowie verschiedene Ansätze zur Verarbeitung und Auswertung der gewonnenen Information. In diesem Abschnitt wird ein Überblick über verschiedene optische Verfahren zur Verkehrsdatenerfassung gegeben. Im Folgenden werden die für diese Arbeit relevanten Veröffentlichungen zur Erfassung von Verkehrsdaten aus monotemporalen Satellitenbilddaten vorgestellt.

Häufige Datengrundlage für die Fahrzeugdetektion bilden Luftbildserienaufnahmen. Unter Verwendung von Luftbildern wurden bereits im sichtbaren und im thermal-infraroten Bereich Verkehrsanalysen durchgeführt. Eine Übersicht an Möglichkeiten zur Extraktion von Fahrzeugen aus verschiedenen flugzeuggetragenen Sensorsystemen geben die Arbeiten von Stilla, et al. (2004) sowie Stilla und Hinz (2006).

Darunter befinden sich einige Ansätze, die vielversprechende und gute Ergebnisse liefern. Bei Luftbildern fehlt es jedoch an der räumlichen Abdeckung. Aus diesem Grund wird die Verwendung von Satellitenbildern angestrebt. Prinzipiell gibt es zwei verschiedene satellitengetragene Sensoren, die zur Sammlung von Verkehrsdaten benutzt werden können. Es wird unterschieden zwischen optischen Szenen und Synthetic-Aperatur-Radar Bildern (SAR), deren zweidimensionale Erfassung der Erdoberfläche mittels aktivem Radar erfolgt (Leitloff, et al., 2010).

Die aktuellen Entwicklungen von Radarsystemen zur Verkehrsdatenerfassung sind sehr vielversprechend. Am 15.06.2007 und am 21.06.2010 starteten die Missionen von TerraSAR-X und TanDEM-X. Dabei handelt es sich um zwei fast identische Erdbeobachtungssatelliten, die beide mit einem leistungsfähigen SAR-Radarsystem ausgestattet sind. Durch die Kombination beider Systeme sind das Erfassen von Fahrzeugen, geografische Positionsbestimmungen sowie Geschwindigkeits-, Richtungs-, und Beschleunigungsbestimmungen möglich. Außerdem ist eine Unterscheidung zwischen bewegten und stehenden Objekten gegeben. Erste Ergebnisse liefern im Mittel einen Geschwindigkeitsfehler von  $1 \frac{km}{h}$  und Positionsfehler von ca. 20 m (DLR, 2013).

In optischen Satellitenbild-Szenen wurde eine neue Methode zur Bestimmung des Versatzes von Objekten und ihren daraus resultierenden Geschwindigkeiten in Etaya, et al. (2004) durchgeführt. Eine bisher nicht untersuchte Anwendung von hochauflösenden optischen Satellitenaufnahmen wird darin geschildert. Der durch den Pushbroom-Scanner verursachte zeitliche Versatz von 0,2 s innerhalb einer QuickBird-Szene wird erstmals für Verkehrsmessungen verwendet, der bisher als ungewünschter Nebeneffekt galt.

Mittlerweile gibt es einige Veröffentlichungen, die sich mit der Zeitdifferenz während der Datenaufnahme zwischen den Kanälen bei Pushbroom-Scannern beschäftigen. Für QuickBird-2-Daten, deren Erfassung über ein Multispektral-(MS-) und ein panchromatisches-(PAN-)Array erfolgt, wurden bereits automatische Verfahren zur Extraktion von Fahrzeugen entwickelt (Zhen & Yun, 2008) (Leitloff, et al., 2004).

Zur Informationsgewinnung bezüglich des Verkehrs aus WorldView2-Aufnahmen gibt es aktuell erst wenige Arbeiten. Anders als bei QuickBird-2-Aufnahmen muss hier zuerst die Zeitdifferenz zwischen den drei Arrays, dem Multispektral1-(MS1-), dem PAN- und dem Multispektral2-(MS2-) Array bestimmt werden.

In einer von Tao und Yu (2011) veröffentlichten Studie werden zwei unterschiedliche Verfahren zur Bestimmung der Zeitdifferenz  $\Delta t$  vorgestellt. Als Datengrundlage dienen zwei von DigitalGlobe zur Verfügung gestellte WV-2 Szenen vom 03.01.2010. Die Satellitenbilddaten decken das Gebiet um den Hongqiao Airport in Shanghai, China ab.

Die erste Methode beruht auf der Tatsache, dass die Geschwindigkeit einer geradlinigen, gleichförmigen Bewegung aus der zurückgelegten Strecke und der dafür benötigten Zeit berechnet werden kann. Messobjekt war ein Flugzeug, das sich gerade im Landeanflug auf den Hongqiao Flughafen befand. Die Bildeigenschaften wurden mithilfe des Flugzeugs analysiert und bestimmt. Dabei wurde festgestellt, dass das Flugzeug nur drei verschiedene Positionen über die neun verfügbaren Kanäle einnahm. Die Position veränderte sich ausschließlich zwischen den Arrays, folglich gibt es keine Zeitdifferenz zwischen den Kanälen eines Arrays. Für das weitere Vorgehen wurde deshalb nur das

Verhältnis zwischen den Kanälen Blau, Coastal Blue und dem panchromatischen Kanal (PAN) betrachtet. Die von Blau zu Coastal Blue durch das Flugzeug zurückgelegte Strecke und das Flugzeug selbst wurden vermessen. Aus den gemessenen Dimensionen des Flugzeugs erfolgte die Festlegung des Flugzeugtyps auf eine Boeing 737-400. Die Geschwindigkeit des sich im Landeanflug befindlichen Flugzeuges wurde aus dem zugehörigen Handbuch entnommen. Mit der zurückgelegten Strecke des Flugzeuges von Blau nach Coastal Blue und der bekannten Geschwindigkeit von  $155 \text{ kn} \pm 5 \text{ kn} \triangleq 80 \frac{\text{m}}{\text{s}} \pm 2,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  ergab sich eine Zeitdifferenz  $\Delta t$  von 0,216 s. Im Vergleich zwischen den Abbildungen der drei Kanäle befand sich das Flugzeug auf dem PAN-Bild genau zwischen den Kanälen Blau und Coastal Blue. Daraus wurde gefolgert, dass der panchromatische Kanal ca. 0,1 s nach dem blauen Kanal bzw. 0,1 s vor dem Coastal Blue Kanal aufgenommen wurde (Tao & Yu, 2011).

Im zweiten Verfahren wurde dieselbe Vorgehensweise zur Bestimmung der Zeitdifferenz zwischen dem PAN- und MS-Array verwendet wie es bereits bei QuickBird-2 angewandt wurde. Basierend auf der Gegebenheit, dass das PAN- und MS-Array an unterschiedlichen Positionen in der Brennebene montiert sind, wird durch die Eigenbewegung des Satelliten von Zeitpunkt  $T_1$  zu  $T_2$  der gleiche Abschnitt in PAN und MS erfasst.

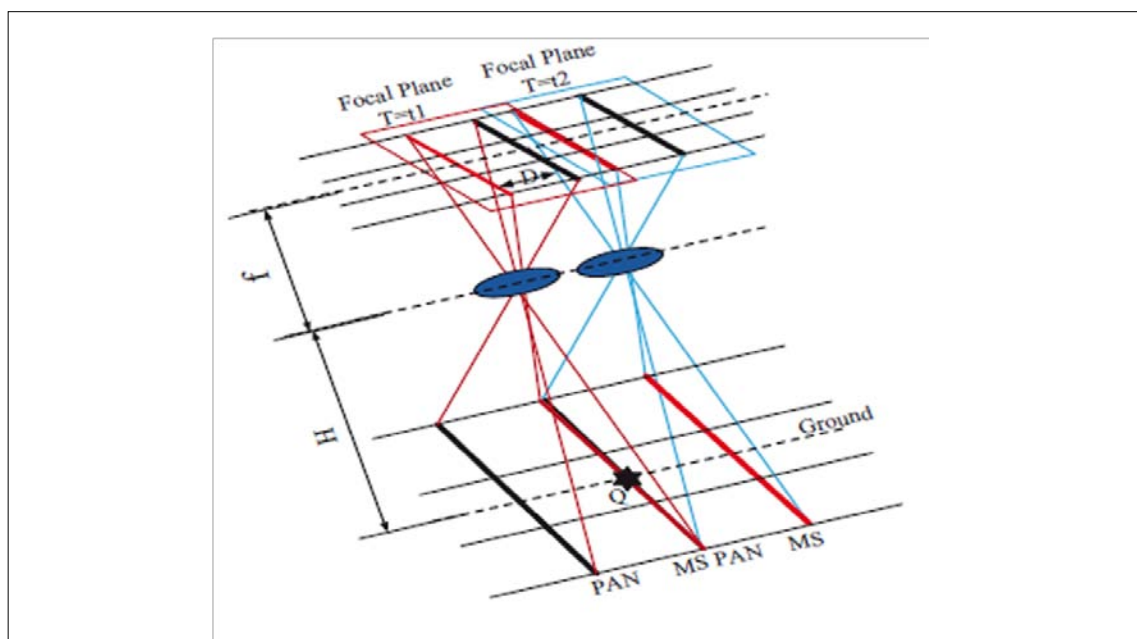


Abb. 1-1: Aufnahmeprinzip QuickBird-2 (Tao & Yu, 2011)

Mit den bekannten Größen, wie dem Versatz zwischen PAN und MS auf der Brennebene  $D$ , der Höhe des Satellitenorbits über Grund  $H$ , der Brennweite des Objektivs  $f$ , der Bodenpixelauflösung  $GSD$  und der Zeilenrate  $LR$  im MS kann die Zeitdifferenz wie folgt berechnet werden:

$$\Delta t = \frac{D * H}{f * GSD * LR}$$

Bis auf die Kenngröße  $D$  sind alle Werte für WorldView-2 bekannt. Unter der Annahme, dass die zwei MS-Arrays von WV-2 im gleichen Abstand wie das MS- und PAN-Array von QuickBird-2 angeordnet sind, wird der Wert für  $D$  übernommen. Als Ergebnis erhalten die Autoren Tao und Yu (2011) die Zeitdifferenz von  $\Delta t = 0,2211$  s.

Zwei Arbeiten, die sich mit einer automatischen Fahrzeugerkennung innerhalb von WV-2-Aufnahmen beschäftigen, benutzen die von Käab (2011) ermittelte Zeitdifferenz. In diesem Artikel wird ein Verfahren beschrieben, das eine Zeitdifferenz zwischen den MS-Bändern von ca. 0,008-0,35 s (siehe Abb. 1-2) und eine Zeitdifferenz zwischen den im gleichen Orbit kurz hintereinander aufgenommenen (along-track) Stereobildpaaren von etwa 30-230 s nachweist. Insgesamt fünf along-track-Szenen wurden verwendet. Das bedeutet es wurden fünf Szenen nacheinander und aus verschiedenen Off-Nadir Winkeln aufgenommen. Die Aufnahmen erfolgten am 19.01.2010 innerhalb einer Zeitspanne von drei Minuten. Zwischen jedem Multispektralkanal in einer Sequenz besteht ein Winkel von  $0,072 * 10^{-3}$  rad er ergibt umgerechnet eine Differenz von ca. 0,008 s. Zwischen dem Red-Edge- und dem blauen Kanal liegt ein Versatz von  $2,65 * 10^{-3}$  rad, das sind etwa 0,30 s, vor. Diese Werte führen zu einer maximalen Zeitdifferenz von ca. 0,35 s zwischen den Kanälen nahes Infrarot1 (NIR1) und nahes Infrarot2 (NIR2).



Nach den Ausführungen von Kääb (2011) ergibt sich die nachstehende Darstellung der Sensorgeometrie des Pushbroom-Scanners.

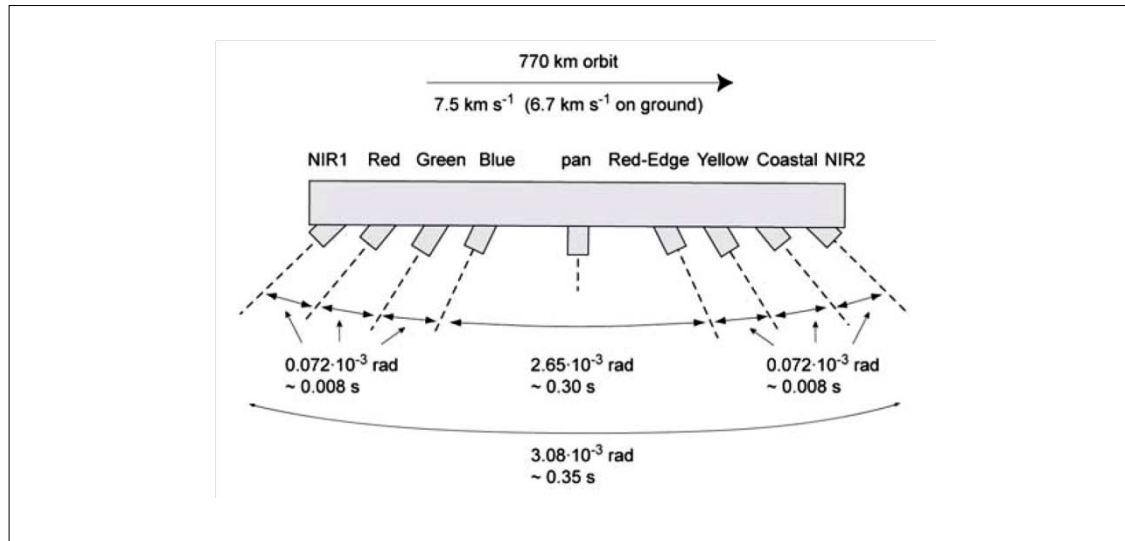


Abb. 1-2: Aufbau der WV-2-Brennebene (Kääb, 2011)

Kääb gibt als Quelle für die Bogenmaße ein persönliches Gespräch mit Herrn Kumar Navulur von DigitalGlobe an (Kääb, 2011).

Im gleichen Jahr veröffentlichte Smiley (2011) von DigitalGlobe eine vereinfachte Darstellung des Bauplans der Brennebene des WV-2-Satelliten. Abgeleitet wurde dieser aus dem Ergebnis der Band-zu-Band-Registrierung, die von DigitalGlobe durchgeführt wurde. Diese exakte Registrierung stand im Mittelpunkt der Multispektral-Kamera-Kalibrierung. Eine genaue Registrierung ist dann wichtig, wenn mit Kanal-kombinationen gearbeitet wird, da die Summe an „ungenauen“ Registrierungen ein Faktor ist, der die Qualität der Daten bzw. Produkte verringert.

Im Falle des WV-2-Satelliten ergeben sich bei einer Anzahl von neun Spektralkanälen 36 mögliche Zwei-Band Kombinationen.

Zur Registrierung wurden die 36 Kombinationsmöglichkeiten in drei Gruppen gegliedert. Die Gruppeneinteilung erfolgt nach der Kombination der Kanäle der drei Arrays des Pushbroom-Scanners PAN, MS1 und MS2. Dabei wurden der panchromatische Kanal mit allen Kanälen der beiden MS-Arrays, die Kanäle des MS1- mit den Kanälen des MS2-Arrays und die Kanäle der MS-Arrays mit jedem Kanal des gleichen MS-Arrays kombiniert (siehe Abb. 1-3).

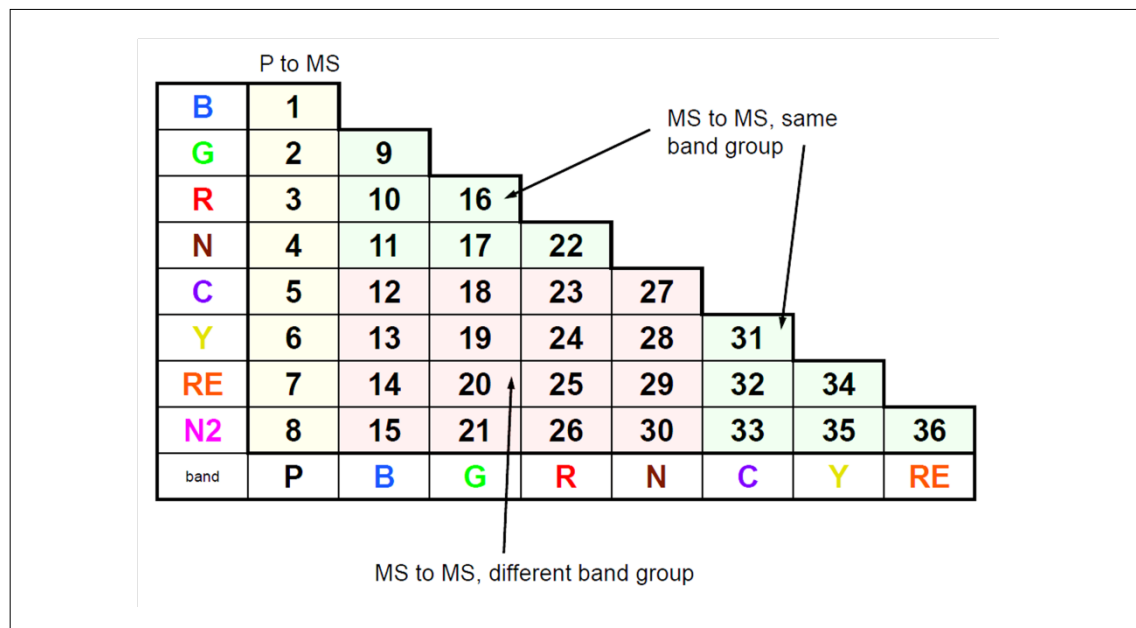


Abb. 1-3: Band-zu-Band Registrierung (Smiley, 2011)

Arrays	Ergebnis	Genauigkeit [m]
MS1-MS1	ca. 90% unter 0,5 PAN Pixel	< 0,25
PAN-MS1	alle 90% unter 1 PAN Pixel	< 0,5
PAN-MS2		
MS1-MS2	ca. 90% knapp über 1 PAN Pixel	> 0,5

Tab. 1-1: Genauigkeiten der Band-zu-Band-Registrierung (Smiley, 2011)

Als Ergebnis der Band-zu-Band Registrierung wurde die nachstehende schematische Darstellung der Brennebene gewählt.

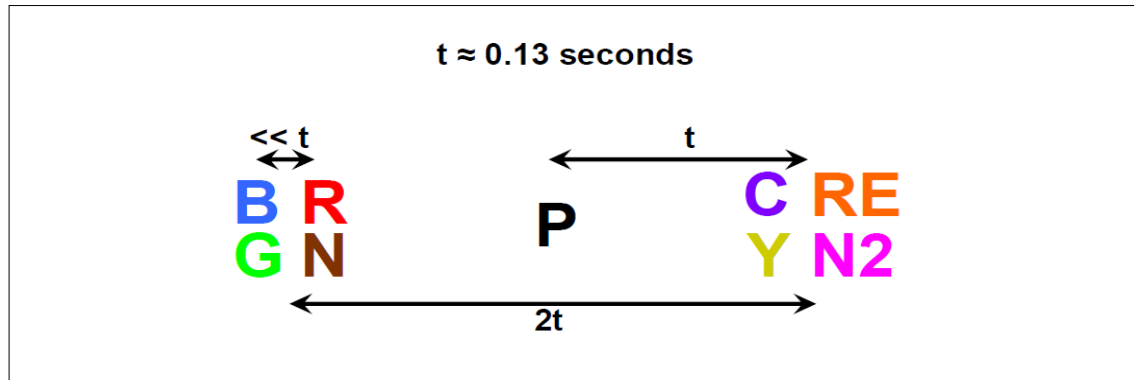


Abb. 1-4: Schematische Darstellung der Brennebene des WV-2 (Smiley, 2011)

Daraus ergibt sich innerhalb der beiden MS-Arrays eine Zeitdifferenz von  $\Delta t \ll 0,13$  s, zwischen einem MS-Array und einem PAN-Array eine Zeitdifferenz  $\Delta t$  von etwa 0,13 s und zwischen den beiden MS-Aufnahmen eine Differenz von ca. 0,26 s (Smiley, 2011).

Krauß, et al. (2013) greifen das Thema zur zeitversetzten Aufnahme der einzelnen Arrays erneut auf. Es wird die Kalibrierung der Zeitdifferenzen von RapidEye durchgeführt, weiter wird ein möglicher Ansatz zur Kalibrierung der WV-2- und Pléjades-Satelliten gegeben. Mithilfe einer RapidEye-Satellitenbildszene vom 08.04.2011 erfolgt die Kalibrierung der Zeitdifferenz zwischen den spektralen Kanälen Rot und Grün. Die sechs Kanäle des Satelliten sind auf zwei Arrays montiert, dabei befinden sich die Kanäle Rot, Red Edge, NIR auf einem Array und die Kanäle Grün, Blau und ein sechster, nicht aktiver Kanal, auf dem anderen Array.

Bedingt durch die fehlende Koregistrierung in der Höhe, steigt mit zunehmender Höhe der räumliche und zeitliche Versatz zwischen den Arrays. Dieser lässt sich anhand der Wolken und Flugzeuge erkennen und berechnen Abb. 1-5.

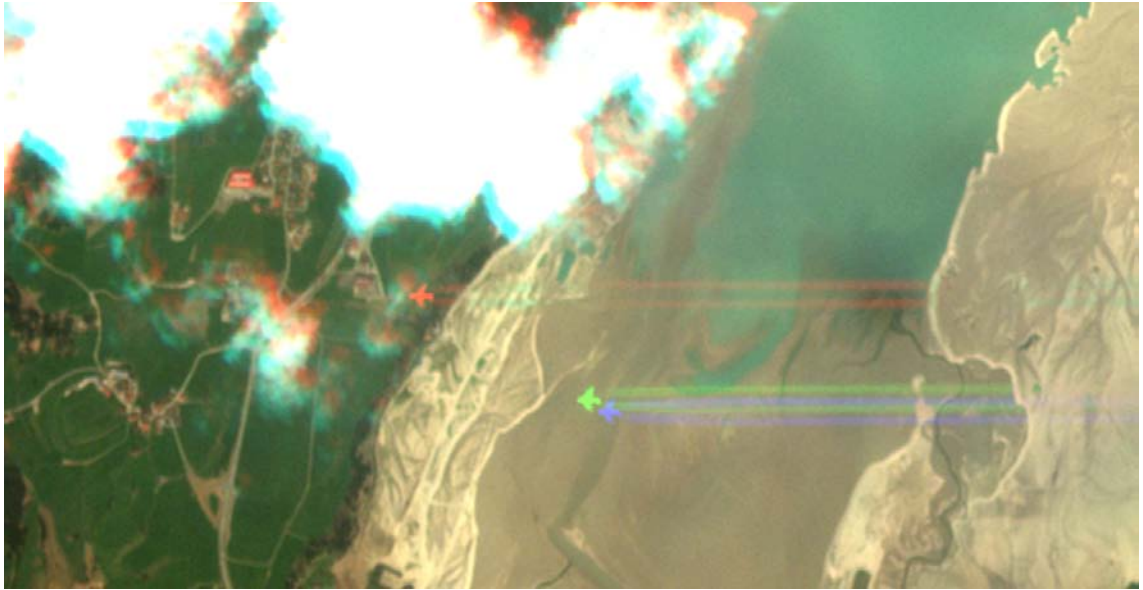


Abb. 1-5: RapidEye-Aufnahme vom 08.04.2011 mit zeitlichem Versatz zwischen den Kanälen Rot, Grün und Blau

Drei verschiedene Messverfahren wurden auf ihre Eignung zur Kalibrierung der Zeitdifferenz  $\Delta t$  geprüft. Neben Fahrzeug- und Flugzeugmessungen wurden Messungen an Wolken durchgeführt, wobei diese die besten Ergebnisse lieferten. Mithilfe der Wolkenhöhe über Grund  $h_c$ , der Wolkenverschiebung  $\Delta s$ , der zurückgelegten Strecke durch den Satellit  $\Delta s_s$  innerhalb der Zeitdifferenz  $\Delta t$ , der Satellitengeschwindigkeit  $v_s$  und der Orbithöhe über Grund  $H_s$  erfolgte die Kalibrierung. Dabei wurde folgende Gleichung verwendet:

$$v_s = \frac{\Delta s_s}{\Delta t} \text{ und } \frac{\Delta s_s}{\Delta s} = \frac{H_s - h_c}{h_c} \rightarrow \Delta t = \frac{H_s - h_c}{h_c} * \frac{\Delta s}{v_s}$$

Als Ergebnis erhalten Krauß, et. al (2013) eine Zeitdifferenz von  $\Delta t = 3,8s \pm 0,7s$  zwischen den Kanälen Rot und Grün.

Die Ergebnisse der Fahrzeugmessungen waren ungenau, da lediglich ein RapidEye Satellitenbild zur Verfügung stand. Deshalb konnten die Fahrzeuggeschwindigkeiten nur aufgrund der zulässigen Höchstgeschwindigkeiten des jeweiligen Straßentyps abgeleitet werden. Hier wird ein Ansatz gezeigt, wie mithilfe mehrerer Satellitenbilder die Kalibrierung der Satelliten WV-2 und Pléiades durchgeführt werden kann (Krauß, et al., 2013).

### 1.5 Zusammenfassung verwandter Arbeiten

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Zeitmessungen der vorgenannten Autoren zusammengefasst. Dazu muss zuerst ein gemeinsamer Bezugspunkt gefunden werden.

Da in den vorgestellten Arbeiten die Anordnung der Kanäle innerhalb der Arrays nicht identisch ist und nicht alle Autoren die Annahme zu einer synchronen Erfassung innerhalb einer Aufnahme bestätigen, kann keine Analyse der Zeitdifferenzen zwischen den jeweiligen Kanälen stattfinden.

<i>Autor</i>	<i>Zeitdifferenz <math>\Delta t</math> [s]</i>	<i>Annahme</i>
<i>Tao und Yu (2011)</i>	0,216	Zeitgleiche Erfassung innerhalb der Arrays
<i>Tao und Yu (2011)</i>	0,221	Zeitgleiche Erfassung innerhalb der Arrays
<i>Kääb (2011)</i>	0,35	Zeitdifferenz zwischen allen Kanälen
<i>Smiley (2011)</i>	0,26	Zeitdifferenz zwischen zwei Kanälen

Tab. 1-2: Vergleich der Zeitdifferenzen verwandter Arbeiten

Folgende Schlussfolgerungen können aus den Arbeiten gezogen werden:

- Die Verteilung der Multispektralkanäle auf die beiden MS-Arrays ist in allen Arbeiten identisch. Die Standardkanäle Rot, Grün, Blau und NIR1 befinden sich auf dem MS1-Array. Die spektrale Erweiterung durch die Kanäle Coastal Blue, Gelb, Red Edge und NIR2 wurde im MS2-Array untergebracht.
- Zuerst erfolgt die Aufnahme eines Geländeabschnitts durch das MS1-Array. Zeitversetzt dazu erfolgt die erneute Aufnahme desselben Geländes durch das PAN-Array. Eine weitere Abbildung des bereits zweimal erfassten Geländestreifens wird durch das MS2-Array vorgenommen.
- Die drei Aufnahmen werden in der Level-1-Prozessierung der Daten auf eine einheitliche Ebene koregistriert.
- Bewegte Objekte befinden sich während jeder Array-Aufnahme an einem anderen Ort. Die PAN-Aufnahme erfolgt zwischen den MS-Aufnahmen, somit ist die Zeitdifferenz zwischen MS1 zu PAN und PAN zu MS2 identisch.

Die nachfolgend aufgeführten Aspekte müssen hierbei noch untersucht werden:

- Die exakte Zeitdifferenz zwischen den Arrays
- Bestimmung der Zeitdifferenz zwischen einzelnen Kanälen, da die bisherigen Ergebnisse unzureichend sind für eine fundierte Aussage. Es muss eine Messung durchgeführt werden, aus der hervorgeht, welche der folgenden Aussagen zutreffend ist.
  - Es erfolgt eine zeitgleiche Erfassung durch jeweils 2 gepaarte Kanäle (Smiley, 2011).
  - Die Abtastung der Erdoberfläche geschieht durch hintereinander angeordnete Kanäle mit jeweils gleichem zeitlichem Abstand zueinander. Aufsummiert ergibt sich zwischen je zwei Kanälen eine Zeitdifferenz von jeweils 0,024 s innerhalb eines Arrays (Käab, 2011).
  - Nach den Arbeiten (Tao & Yu, 2011) ist dieser Zeitversatz nicht messbar und deshalb zu vernachlässigen.

## 2 Fernerkundungssysteme

In diesem Kapitel wird der aktuelle Entwicklungsstand von Fernerkundungssatelliten aufgezeigt. Auf den Satelliten WorldView-2 wird gesondert eingegangen, da er die Datengrundlage für diese Arbeit liefert.

### 2.1 Fernerkundungssatelliten – aktuelle Entwicklungen

Vorreiter auf dem Gebiet der „dritten Entdeckung der Erde aus dem All“ (Bodechtel & Gierloff-Emden, 1974) war 1972 der amerikanische Erdbeobachtungssatellit ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellite), welcher später in LANDSAT-1 umbenannt wurde (Betreiber: NASA). Durch diesen war es erstmals möglich, systematisch gewonnene digitale und multispektrale Aufnahmen der Erdoberfläche zu erhalten.

Wie bereits Kronberg (1985) feststellte, bieten Erderkundungs-Satelliten neue Beobachtungs- und Interpretationsmöglichkeiten, da durch die wiederholte Aufnahme gleicher Geländebereiche Einblicke in jahreszeitliche Abläufe und dynamische Prozesse gewonnen werden können. Durch die verbesserten Fernerkundungstechnologien ist die Bandbreite an Nutzungsmöglichkeiten spektraler Informationen aus Fernerkundungsdaten enorm gestiegen. Gleichmaßen konnte die räumliche Auflösung der multispektralen Sensoren erheblich gesteigert werden. Im Gegensatz zum ersten zivilen Fernerkundungssatelliten LANDSAT-1, der eine Bodenpixelgröße von 79 m in den Multispektralkanälen erzielte, erreichen neue Sensoren deutlich höhere räumliche Auflösungen wie in nachstehender Tabelle aufgezeigt wird.

<i>Satellit</i>	<i>Anbieter</i>	<i>Start</i>	<i>Bodenpixelgröße in Nadirrichtung [m]</i>
QuickBird	DigitalGlobe	2001	0,61 PAN 2,40 MS
SPOT-5	Spot Image Astrium	2002	5,0 PAN Verbesserung auf 2,5 PAN durch Zeilenversatz-Technik
RapidEye	BlackBridge	2008	6,50 MS
WorldView-2	DigitalGlobe	2009	0,48 PAN 1,80 MS

Tab. 2-1: Vergleich der Auflösungen verschiedener Satelliten (ESA, 2013)

## 2.2 Pushbroom-Scanner

Die Bildaufnahme erfolgt meist mittels linear angeordneter Halbleiter-Bildsensoren, den sogenannten Charge Coupled Devices (CCD). Die integrierten Schaltkreise der Halbleiterbauelemente bestehen aus einer Kette eng aneinandergereihter Photodioden, die Photonen in elektrische Ladung umwandeln. Diese Entladungsimpulse werden zeilenweise abgespeichert. Die Abtastung der Erdoberfläche erfolgt somit zeilenweise für die einzelnen Kanäle. Die Kanäle des Sensors sind hintereinander angeordnet und blicken auf unterschiedliche Geländeabschnitte (siehe Abb. 1-1 und Abb. 2-8). Durch die Vorwärtsbewegung des Satelliten wird von jedem Kanal der gleiche Bereich auf der Erdoberfläche gescannt. Der Pushbroom-Scanner unterstützt dabei mehrere Übertragungsraten und Kombinationen. Die Möglichkeit zur bi-direktionalen Abtastung ist auch gegeben, so dass für jeden aufgenommenen Bildstreifen die Scan-Richtung Vorwärts oder Rückwärts möglich ist.

Aus den einzelnen Scanzeilen wird ein Bild erzeugt und die einzelnen Aufnahmen der Kanäle werden in einer Band-zu-Band-Registrierung passgenau koregistriert. Dadurch wird der räumliche Versatz von statischen Objekten in den Aufnahmen beseitigt. Die Band-zu-Band-Zeitdifferenz ist für die meisten Anwendungen unbedeutend. Nur für schnell bewegte Objekte verursacht die geringe Zeitdifferenz kleine Verschiebungen.

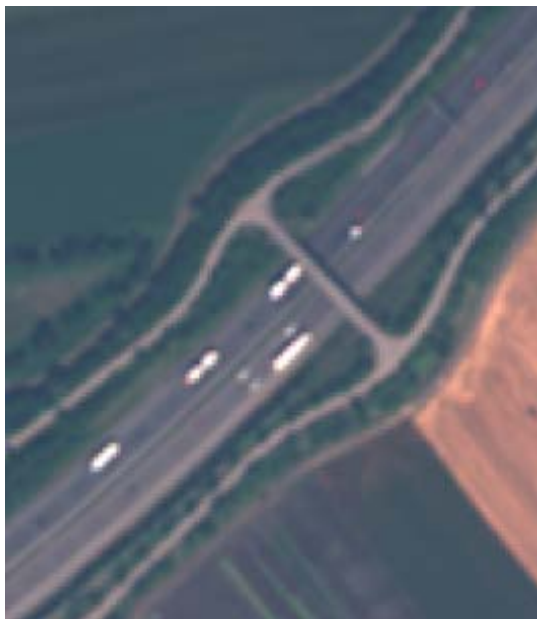


Abb. 2-1: Echtfarbendarstellung von Fahrzeugen in WV-2-Aufnahme (Kanäle: Blau, Grün, Rot, alle auf dem MSI-Array)



Abb. 2-2: Darstellung von Fahrzeugen in WV-2-Aufnahme (Kanäle: Rot, Rot, Gelb, Kombination aus MSI- und MS2-Array).



Die Abb. 2-2 entsteht durch eine Kombination der Kanäle Rot (MS1-Array) zweifach geladen und Gelb (MS2-Array). Die Cyanfärbung zeigt die Position des Fahrzeugs zum Zeitpunkt  $T_1$  (Kanal Rot). Der weiße Bereich zeigt den Teil des Fahrzeugs, der in beiden Bildern gleichzeitig vorhanden ist; er wird in Graustufen dargestellt. Die rote Struktur entsteht durch die Positionsänderung des Fahrzeugs innerhalb der Zeitdifferenz und wird zum Zeitpunkt  $T_2$  (Kanal Gelb) aufgenommen. Mithilfe dieser Verschiebung wird die Kalibrierung für  $\Delta t$  durchgeführt; sie bildet die Grundlage für die hier beschriebene Kalibrieremethode.

Die Pixelgröße auf der Erde (Bodenpixel) ist abhängig von der Flughöhe über Grund, der Größe der CCD-Photodioden und der Kamerabrennweite. Im Zusammenhang mit der Auflösung von Satellitenbildern fällt häufig der Begriff „Ground Sampling Distance“ (GSD). Allgemein kann davon ausgegangen werden, dass die GSD gleich der Bodenpixelgröße ist. Sie bezeichnet den Abstand der Bodenpixelzentren. Die GSD in Bewegungsrichtung ergibt sich aus der Multiplikation von Bodengeschwindigkeit der Abbildung und dem Ausleseintervall. Das Ausleseintervall ist in allen Satelliten so gewählt, dass es der Bodenpixelgröße quer zur Flugrichtung entspricht. Dabei erreichen einige Satelliten (QuickBird) diese Auslesegeschwindigkeit nur durch kontinuierliche Rotation der Kamera.

Das Aufnahmeprinzip des Pushbroom-Scanners wurde bereits in Abb. 1-1 gezeigt, dies gilt ebenfalls für den Scanner des WorldView-2-Satelliten. Einziger Unterschied hierbei ist, dass die Aufnahme über drei Arrays erfolgt.

### 2.3 WorldView-2

WorldView-2 ist ein kommerzieller, hochauflösender, optischer Erdbeobachtungssatellit der Firma DigitalGlobe, der am 08.10.2009 in den USA von der Vandenberg Air Force Base, gestartet wurde. Mit einer Delta-II-Rakete wurde der Satellit in einen 770 km hohen, sonnensynchronen Orbit mit einer Bahnneigung von  $97,8^\circ$  befördert. Die Dauer eines Orbits beträgt 100,2 Minuten; immer zur gleichen lokalen Ortszeit um 10:30 Uhr überquert er den Äquator von Nord nach Süd. Die Flugbahn des Fernerkundungssatelliten ist elliptisch und folgt den Keplerschen Gesetzen, sofern keine Störungen seitens anderer Planeten oder der Atmosphäre vorhanden sind. Die Umlaufbahn wird durch mehrere Bahnelemente beschrieben; hierbei unterscheidet man zwischen drei verschie-

denen Formaten, dem NASA/NORAD Two Line Elements-Format, dem AMSAT-Format und einem eher selten verwendeten Vektorformat (Mitte & Unger, 2013).

Im Folgenden wird das NASA/NORAD Two Line Elements-Format (TLE) verwendet. Dabei handelt es sich um ein zweizeilig kodiertes Format der Satellitenbahnelemente, die von der NASA oder AMSAT zur Verfügung gestellt werden. Die Parameter weichen vom klassischen Parametersatz ab. Anstelle der großen Halbachse  $a$  ist die mittlere Winkelgeschwindigkeit  $n$  gegeben. Die zeitabhängige Position des Satelliten wird durch die Uhrzeit  $t$  und die Mittlere Anomalie  $M$  festgelegt.

Der Aufbau eines TLE Datensatzes soll anhand einer Momentaufnahme des Satelliten WorldView-2 vom 07.12.2012 verdeutlicht werden.

```
1 35946U 09055A 12342,12859329 .00000126 00000-0 56297-4 0 5175
2 35946 098.4688 059.1703 0000999 036.9163 323.2103 14,37684599165981
```

Abb. 2-3: WorldView-2 TLE Datensatz vom 07.12.2012 (Infosatellites, 2012)

Anschließend wurde das Format zur besseren Übersicht mit Leerzeichen, Exponenten, führenden Nullen und Dezimalpunkten ergänzt.

```
1 35946_U 09055A 2012_342,12859329 0,00000126 0,00000e-0 0,56297e-4 0 517_5
2 35946 098,4688 059,1703 0,0000999 036,9163 323,2103 14,37684599_16598_1
```

Abb. 2-4: WorldView-2 modifizierter TLE Datensatz vom 07.12.2012

Die Erläuterung und Aufspaltung der TLE in Einzelwerte erfolgt nach dem von der NASA veröffentlichten Prinzip.

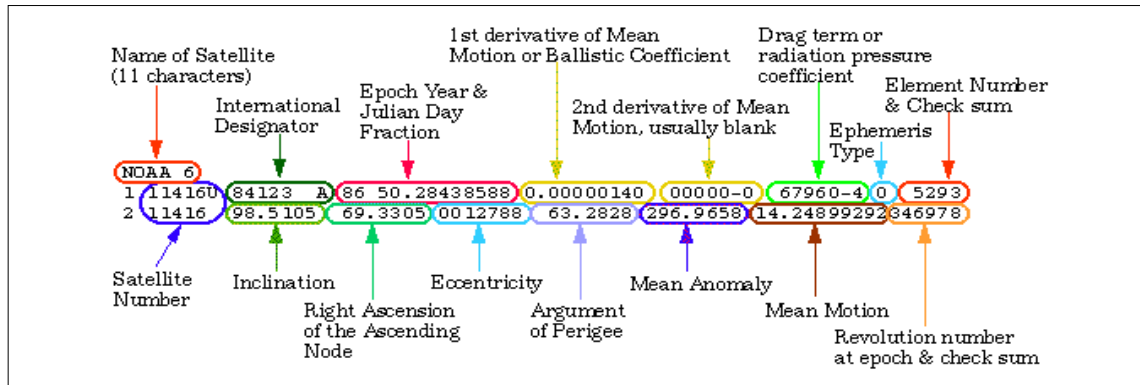


Abb. 2-5: Definition der TLE (Kauderer, 2011)

Erläuterung der 1. Zeile:

```
1 35946_U 09055A 2012_342,12859329 0,00000126 0,00000e-0 0,56297e-4 0 517_5
```

Wert	Beschreibung
1	Zeilen Nummer: 1
35946	NORAD-Katalog-Nummer
U	Klassifizierung: hier U = unklassifiziert
09055A	Internationale Bezeichnung: Startjahr (2 Ziffern): hier: 2009, Startnummer im Jahr (3 Ziffern): hier: 055, Objekt des Starts (max. 3 Zeichen) hier: A
2012	Epoche: Jahr 2012
342,12859329	Epoche: Tag-Nr. 342 = 7. Dezember, Tagesbruchteil 0,12859329 = 3 h 5 min 00,0 s
0,00000126	Widerstandskoeffizient im SGP-Modell: $\dot{n}/2 = 0,00000126 \text{ d}^{-2}$
0,00000e-0	vernachlässigbarer Widerstandskoeffizient im SGP-Modell (meist Null): $\ddot{n}/6 = 0 \cdot 10^{-0} \text{ d}^{-3}$
0,56297e-4	Widerstandskoeffizient im SGP4-Modell: $B^* = 5,6297 \cdot 10^{-5} \text{ Erdradien}^{-1}$
0	Ephemeridentyp (0 = SGP4-Modell)
517	Laufende Datensatz-Nummer
5	Prüfsumme Modulo 10

Tab. 2-2: TLE Erläuterung 1. Zeile

Erläuterung der 2. Zeile:

2 35946 098,4688 059,1703 0,0000999 036,9163 323,2103 14,37684599\_16598\_1

<i>Wert</i>	<i>Beschreibung</i>
2	Zeile Nr. 2
35946	NORAD-Katalog-Nr.
098,4688	Inklination $i = 98,4688^\circ$
059,1703	Rektaszension des aufsteigenden Knotens $\Omega = 59,1703^\circ$
0,0000999	numerische Exzentrizität der Umlaufbahn $\varepsilon = 0,0000999$
036,9163	Argument des Perigäums $\omega = 36,9163^\circ$
323,2103	Mittlere Anomalie $M = 323,2103^\circ$
14,37684599	Mittlere Bewegung: $n = 14,37684599 \text{d}^{-1}$
16598	Umlauf Nr. 16598 seit dem Start
1	Prüfsumme Modulo 10

Tab. 2-3: TLE Erläuterung 2. Zeile

Aus den in Tab. 2-2 und Tab. 2-3 aufgeführten Bahndaten ergeben sich die Parameter der Keplerschen Bahnelemente des WorldView-2-Satelliten. Diese geben Auskunft über die exakte Lage und Orientierung der Umlaufbahn sowie die Position und Widerstandskoeffizienten des Satelliten. Mit diesen oben aufgeführten Werten können weitere Elemente wie die große und die kleine Halbachse, die Abstände des Perigäums und des Apogäums abgeleitet werden. Die für die Beschreibung der Satellitenbahnlage relevanten Parameter sind in nachstehender Tabelle zusammengefasst aufgeführt.

<i>Parameter</i>	<i>Wert</i>
<i>Epoche</i>	$t = 07-12-2012; 03:05:00,0h \text{ UTC}$
<i>Inklination</i>	$i = 98,4688^\circ$
<i>Rektaszension des aufsteigenden Knotens</i>	$\Omega = 59,1703^\circ$
<i>Argument des Perigäums</i>	$\omega = 36,9163^\circ$
<i>Mittlere Bewegung</i>	$n = 14,37684599d^{-1}$
<i>Numerische Exzentrizität</i>	$\varepsilon = 0,0000999$
<i>Mittlere Anomalie</i>	$M = 323,2103^\circ$
<i>Widerstandskoeffizient im SGP-Modell</i>	$\dot{n}/2 = 0,00000126 d^{-2}$
<i>Widerstandskoeffizient im SGP4-Modell</i>	$B^* = 5,6297 \cdot 10^{-5} \text{ Erdradien}^{-1}$

Tab. 2-4: Bahndaten des WV-2

Um ein anschauliches Bild der Flugbahn des Satelliten zu zeigen, wurde eine Echtzeitverfolgung (Tracking) des WV-2 durchgeführt. Die rote Linie stellt den Groundtrack (Bodenspur) des Satelliten dar. Dabei befand er sich auf der geografischen Position von  $8^{\circ} 15' S$  und  $110^{\circ} 26' E$  bei einer Flughöhe von 770,82 km und umkreiste die Erde in Nordrichtung (ascending Orbit) mit einer Geschwindigkeit von 7,80 km/s. Der Satellit befindet sich zur Zeit des Trackings nördlich von Australien, um 24:00 Uhr Lokalzeit. Die Aufnahmen des Satelliten erfolgen ausschließlich zur Tagzeit. Die Flugbahn des Satelliten wird in nachstehender Abbildung gezeigt, daraus wird auch ersichtlich, dass zur Zeit des Trackings im Osten Brasiliens Mittagszeit, also 12:00 Uhr Lokalzeit herrschte.



Abb. 2-6: WV-2 Echtzeitverfolgung vom 10.11.2013 um 16:06 GMT (n2yo, 2013)

Der Satellit WorldView-2 hat die gleiche Bauform wie sein Vorgänger WorldView-1. Im Vergleich zu diesem kann er eine größere Nutzlast mit sich führen; und besitzt neben dem PAN-Kanal acht Multispektralkanäle. WV-2 nimmt pro Tag eine Fläche von 975.000 km<sup>2</sup> auf, dies entspricht etwa der 2,7-fachen Ausdehnung von Deutschland. Die Kombination aus höherer Beweglichkeit und der Flughöhe von 770 km ermöglicht eine erneute Aufnahme jedes Ortes auf der Erde in 1,1 Tagen (Widerholungsrate).

Im Januar 2010 erreichte der Satellit seine volle Einsatzfähigkeit und liefert seitdem hochaufgelöste Satellitenbilder und Stereobild-Aufnahmen, die gewerblich verfügbar sind. WV-2 ist der erste kommerzielle Satellit, der eine sehr hohe räumliche Auflösung in achtkanaligen MS-Bildern liefert. Ausgestattet mit dem hochauflösenden optischen Aufnahmesystem übermittelt er Daten in einer Bodenpixelgröße von 0,46 m im panchromatischen Kanal in Nadirrichtung. Neben dem panchromatischen Kanal werden die in Tab. 2-5 aufgeführten Multispektralkanäle mit einer Bodenpixelgröße von 1,85 m in Nadirrichtung aufgenommen (ESA, 2013).

<i>Kanal (siehe auch Abb. 2-7)</i>	<i>Spektralbereich [nm]</i>	<i>Bodenpixelgröße in Nadirrichtung [m]</i>	<i>Bodenpixelgröße bei 20° Blickwinkel [m]</i>
Panchromatisch	450 – 800	0,46	0,52
Coastal Blue	400 – 450	1,85	2,07
Blau	450 – 510	– “ –	– “ –
Grün	510 – 580	– “ –	– “ –
Gelb	585 – 625	– “ –	– “ –
Rot	630 – 690	– “ –	– “ –
Red Edge	705 – 745	– “ –	– “ –
NIR1	770 – 895	– “ –	– “ –
NIR2	860 – 1040	– “ –	– “ –

Tab. 2-5: Kanäle des WV-2 (DigitalGlobe (2010)), siehe auch Abb. 2-9

Insgesamt werden neun Kanäle mittels Pushbroom-Scanner erfasst. Neben den Standardkanälen Blau, Grün, Rot und NIR1 sind weitere vier Kanäle vorhanden. Diese Erweiterung schafft die Voraussetzungen zur verbesserten Kartierung unterschiedlicher Vegetationsarten und Klassifikationen von Bodenbedeckungstypen und Pflanzenarten.

Der Kanal Coastal Blue ermöglicht die Untersuchung und Unterscheidung von Küstengebieten, Meeresböden (benthale Lebensräume), Sumpfgebieten und die Beurteilung der Küstenwasserqualität. Die Kombination von Gelb und Red Edge füllt wichtige Lücken im Spektrum, die zur Erfassung der Vegetations-Phänomenologie nützlich sind. Die Verwendung von Coastal Blue und NIR2 ermöglicht eine Differenzierung zwischen Vegetationstypen und künstlichen Materialien. Insgesamt bietet die breite spektrale Abdeckung die Fähigkeit zur robusteren Modellierung und besseren Abgrenzung von spektralen Signaturen.

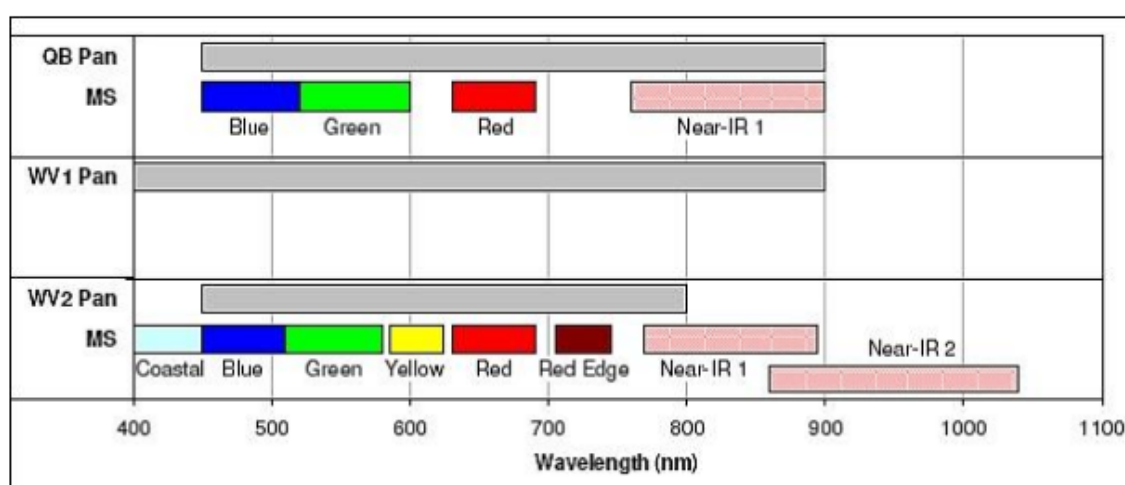


Abb. 2-7: Spektralbereiche des WV-2-Satelliten im Vergleich zu Quickbird (ESA, 2013)

Die Brennebene der WV-110-Kamera besitzt einen Detektorabstand von acht Mikrometern im PAN-Array und 32 Mikrometer in den zwei MS-Arrays (MS1 und MS2). Neben dem MS1-Array, in dem die vier Standardkanäle Blau, Grün, Rot und NIR1 montiert sind, gibt es vier zusätzliche Kanäle Red Edge, Gelb, Coastal Blue und NIR2, die im MS2-Array angeordnet sind. Die MS-Zeilen befinden sich jeweils auf verschiedenen Seiten des PAN-Array (siehe Abb. 2-8). Weiter sind die MS-Zeilen in zehn und das



PAN-Array in fünfzig versetzt angeordnete multispektrale bzw. panchromatische DSAs (Detector Sub-Array) segmentiert. Jedes Sub-Array beinhaltet vier parallele Reihen von Detektoren mit jeweils unterschiedlichem Farbfilter.

Die einzelnen Bänder werden durch ein getrennt auslesendes Register gesammelt. Für das PAN-Array werden zwei separate Ausleseregister für die jeweils fünfzig DSA verwendet. Dabei besitzt jede Ausleseregistervorrichtung einen eigenen Analog-zu-Digital-Wandler (DigitalGlobe, 2010)

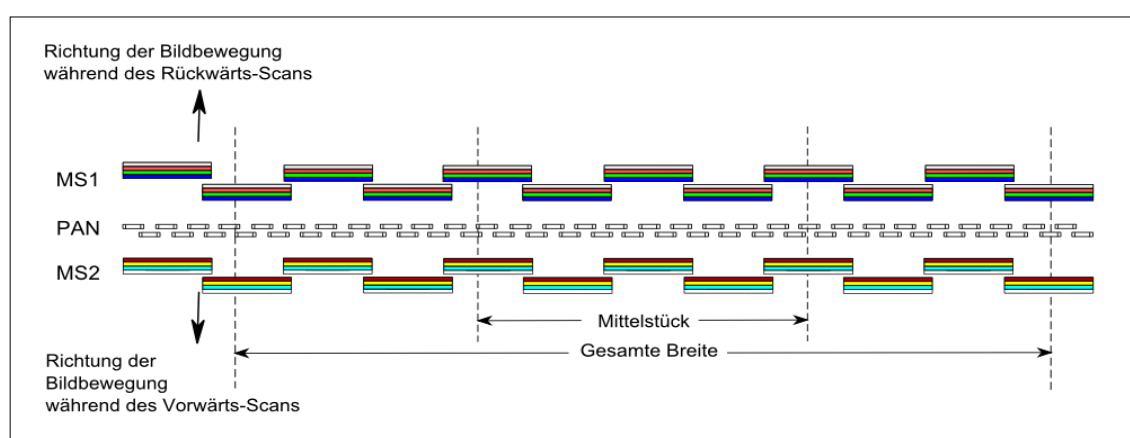


Abb. 2-8: Aufbau der Brennebene des WV-2 Satelliten (eigene Grafik, basiert auf Daten von DigitalGlobe (2010))

Die Spektrale Empfindlichkeit des Sensors ist definiert durch das Verhältnis zwischen Ausgangsstrom und eingestrahelter Lichtleistung. Sie ist wellenlängenabhängig und wird für jeden Kanal einzeln angegeben (siehe Abb. 2-9).

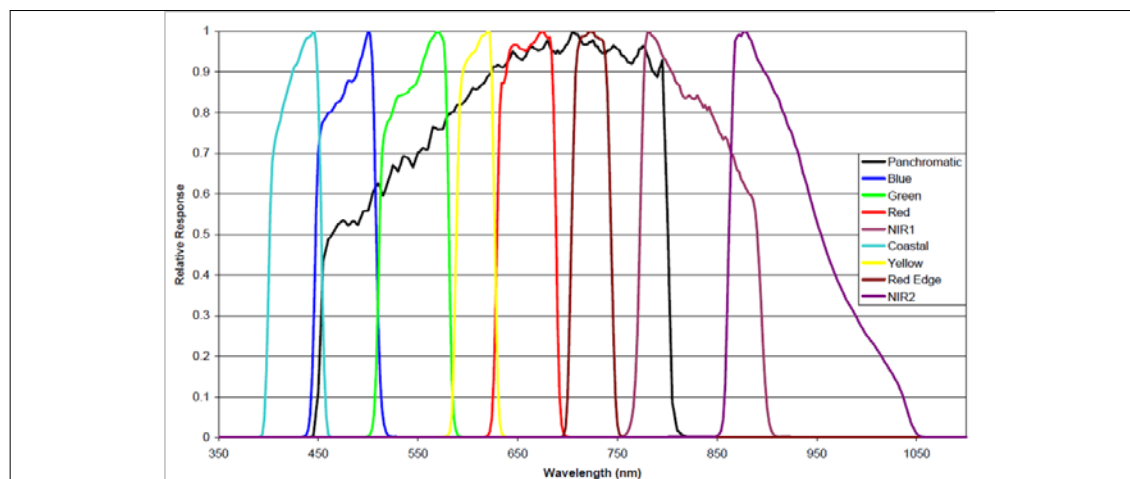


Abb. 2-9: Spektrale Empfindlichkeit des WV-2-Satelliten (DigitalGlobe, 2010)

---

### 3 Datengrundlage

---

Die Datengrundlage für die hier vorgestellte Analyse bilden jeweils drei WorldView-2-Szenen der Stadtgebiete von München und London. Eine Szene besteht jeweils aus einem Multispektralbild (MS) mit einer geometrischen Auflösung von 2 m und einer panchromatischen Aufnahme (PAN) mit einer Bodenpixelgröße von 0,5 m. Die beiden Aufnahmen erfolgen jeweils zeitgleich.

Das MS-Bild ist aus den in Tab. 2-5 genannten acht Multispektralkanälen aufgebaut und zeigt daher in der Aufnahme einen Versatz von bewegten Objekten. Dieser ist bedingt durch die Aufteilung der Multispektralkanäle auf zwei Arrays, MS1 und MS2, deren Aufnahme asynchron verläuft. Statische Objekte bleiben an ihrer Position, da durch eine Band-zu-Band-Registrierung die Aufnahmen der Kanäle genau aufeinander liegen. Die Zeitdifferenz zwischen MS1 und MS2 kann folglich mithilfe bewegter Objekte zum Beispiel Fahrzeuge herausgefunden werden.

#### 3.1 München

Die Aufnahmen des Großraums München erfolgten am 12.07.2010 vormittags gegen 10:30 Uhr GMT. Zu dieser Zeit herrschte sonniges Wetter mit geringer Bewölkung im Süd-Westen. Die Satellitenbilder wurden in kurzen Zeitabständen hintereinander aufgenommen. Während der Aufnahme rotierte der Satellit so, dass die drei Szenen aus unterschiedlichen Richtungen aufgenommen wurden. Die Szenen decken nicht den gleichen Bereich ab, da die Szenen 1 und 3 den Westen und die Szene 2 den Osten von München aufgenommen hatten. Aus diesem Grund haben die Satellitenbilder unterschiedliche Eckkoordinaten sowie Zeilen- und Spaltenanzahlen. In nachstehender Tab. 3-1 werden diese Daten aufgelistet. Die Angaben wurden aus den Auxillary-Files der Satellitenbilder entnommen (siehe Kapitel 4.2).

<i>Bild</i>	<i>Kanal</i>	<i>Mitte der linken oberen Ecke in UTM-Koordinaten [m]</i>		<i>Bildgröße</i>	
		<i>Rechtswert</i>	<i>Hochwert</i>	<i>Spalten</i>	<i>Zeilen</i>
1	MS	675901.00	5346535.00	8206	9990
	PAN	675901.50	5346534.50	32823	39960
2	MS	686101.00	5346535.00	8150	9990
	PAN	686482.25	5346039.75	32600	38944
3	MS	675901.00	5346535.00	8125	9990
	PAN	675900.25	5346535.75	32497	39960

Tab. 3-1: Abdeckung der Satellitenbilder von München, siehe auch Abb. 3-1

Die unterschiedliche Anzahl von Spalten und Zeilen bei MS und PAN sind durch das Verhältnis der Auflösung von 2 m und 0,5 m bedingt, das auch den Versatz von 0,5 m in den UTM-Koordinaten erklärt.

Die folgende Abbildung zeigt die genaue Lage der München-Szenen sowie ihre geographische Ausdehnung. Da ausschließlich das Stadtgebiet München als „area of interest“ angegeben wurde, bilden die von DigitalGlobe gelieferten Szenen nur die Stadtgrenzen ab.

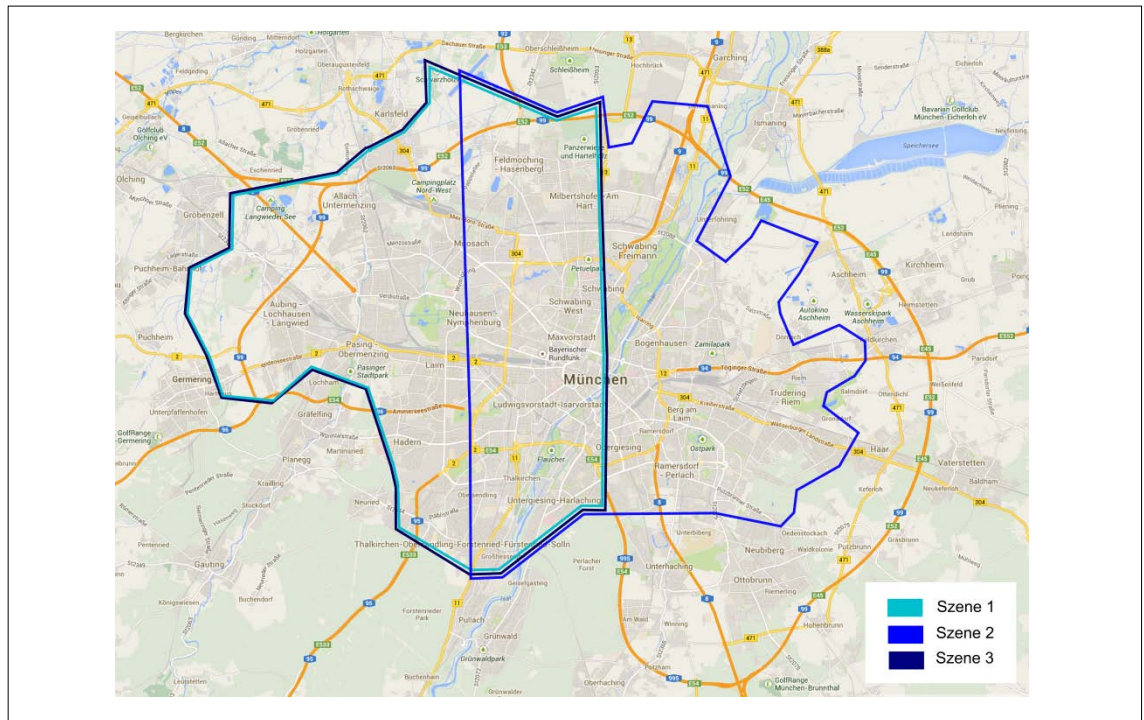


Abb. 3-1: Abdeckungen der einzelnen München-Szenen (GoogleMaps, 2013)

Das in Kapitel 4.2 erklärte Bildbearbeitungsprogramm XDibias bietet die Möglichkeit, drei Kanäle drei verschiedener Bilder gleichzeitig in einer Darstellung zu zeigen. Diese Kombination ermöglicht es, alle drei Bilder gleichzeitig anzuzeigen und ihren Überlappungsbereich exakt zu visualisieren. Für die Darstellung wurde der rote Kanal des ersten Bildes, der grüne Kanal des zweiten Bildes und der blaue Kanal des dritten Bildes geladen. Der Bildbereich, welcher in allen drei Aufnahmen enthalten ist, entsteht durch Überlagerung der Kanäle Rot, Grün und Blau und wird somit in Echtfarben dargestellt.

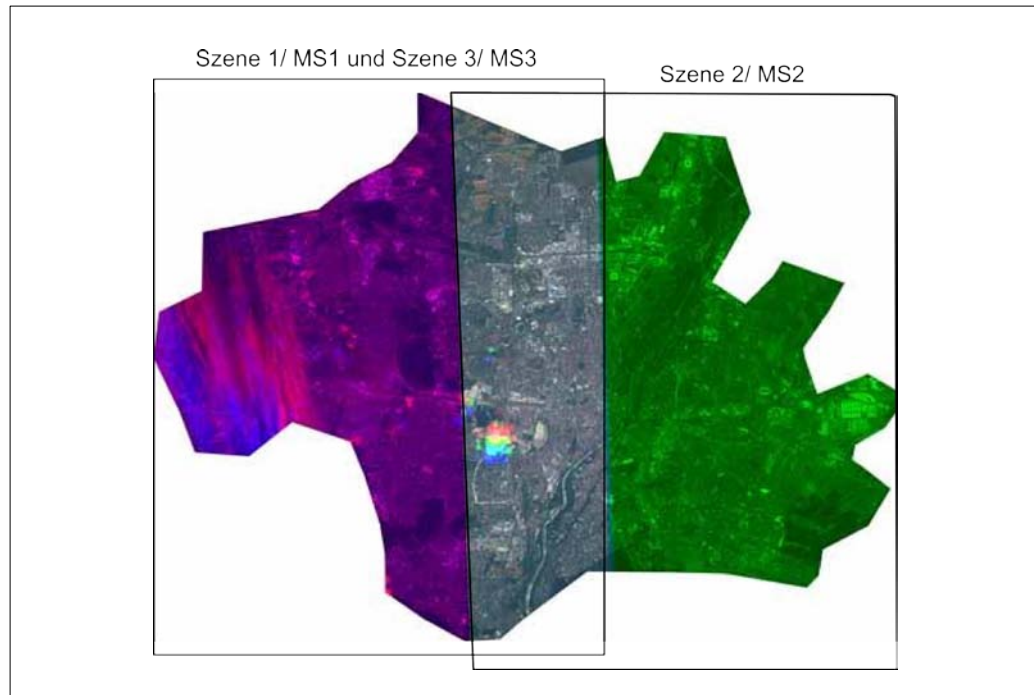


Abb. 3-2: Überlagerung der drei München-Szenen: RGB = rot (MS1), grün (MS2), blau (MS3)

Ausschließlich der mittlere Streifen des abgebildeten Gebietes wurde in allen drei Szenen und den entsprechenden Bildern erfasst und kann für die Kalibrierung genutzt werden.

Die einzelnen Szenen wurden zu unterschiedlichen Zeitpunkten und aus unterschiedlichen Aufnahmerichtungen aufgenommen (siehe Tab. 3-2).

<i>München-Szene</i>	<i>Aufnahmezeitpunkt [GMT]</i>	<i>Scene-Incidence</i>	<i>Scene-Azimuth</i>
MS1	10:29:57,79	14,5°	18,9°
MS2	10:30:16,59	5,2°	17,7°
MS3	10:30:40,39	6,5°	186,9°

Tab. 3-2: Aufnahmedaten der München-Szenen

Zur Veranschaulichung wurden die Scene-Incidence-Winkel der München Szenen in Abb. 3-3 schematisch dargestellt. Der Zusammenhang der Scene-Incidence- und Scene-Azimuth-Winkel wird in Abb. 3-8 dargestellt.

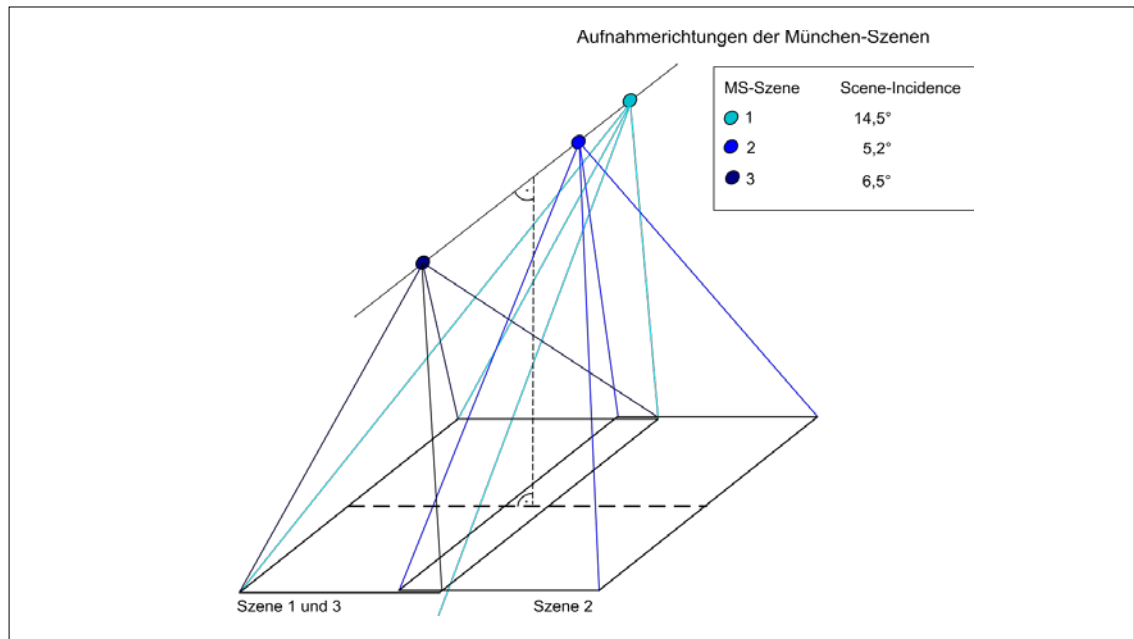


Abb. 3-3: Aufnahmeorientierungen der München-Szenen

Außerdem ist der bewegliche Sensor des Satelliten in der Lage, in und gegen die Flugrichtung zu scannen; hier wurden die Szenen 1 und 2 im Vorwärts-Scan und die Szene 3 im Rückwärts-Scan aufgenommen. Die Scanrichtung ist für die spätere Auswertung wichtig, da sich die Aufnahmezeitpunkte, die aus den Metadaten der Originalaufnahmen entnommen wurden, jeweils nur auf den Zeitpunkt des Scans der ersten Zeile (First Line Time) im Satellitenbild beziehen. Für jedes Satellitenbild sowohl MS als auch PAN ist die First Line Time (FLT) angegeben. Im Vorwärts-Scan wird der Sensor von Nord nach Süd und im Rückwärts-Scan von Süd nach Nord geschwenkt.

Anhand der folgenden Abb. 3-4 wird die Bedeutung der FLT erklärt, in welcher jeweils die Bewegung eines Fahrzeuges innerhalb des Bildes zwischen dem MS1- und MS2-Array dargestellt ist. Die Farbgebung der Fahrzeuge entspricht den MS-Kanälen Rot (r) und Gelb (g) und wurde an die Kanalfarben angepasst. Im weiteren Verlauf der Arbeit

wurden aufgrund des besten Kontrastverhältnisses die Kanäle Rot (MS1-Array) und Gelb (MS2-Array) miteinander verglichen.

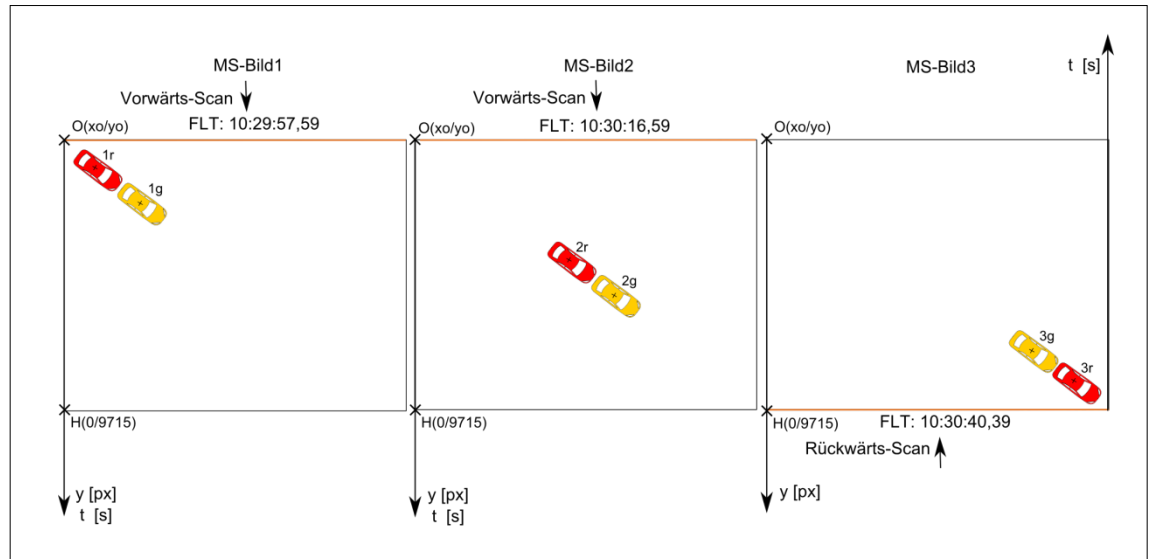


Abb. 3-4: Scanrichtungen der München-Szenen

Laut DigitalGlobe (2010) benötigt der Scanner für den Scan einer Zeile eine Zeit von:

$$\Delta t_l = \frac{1}{3000} s$$

Betrachtet man in Abb. 3-4 das MS1-Bild, dessen erste Zeile um 10:29:57 Uhr GMT im Vorwärts-Scan aufgenommen wurde (orange eingezeichnet), wird deutlich, dass das Fahrzeug bereits unmittelbar zu Beginn des Scans aufgenommen wird. Wäre das Bild im Rückwärts-Scan aufgenommen worden, müssten mehrere Scanzeilen aufgenommen werden, um die Position des Autos zu erreichen. Aus diesem Grund ist die Scanrichtung in der Aufnahme des Satellitenbildes sehr wichtig, da in der Kalibrierung der exakte Zeitpunkt der Aufnahme für jedes Auto berechnet werden muss. Lediglich bei Fahrzeugen, die sich in der Mitte des Bildes (ca. Scanzeile 5000) befinden, ist die Scan-Richtung unbedeutend.



### 3.2 London

Die London-Szenen wurden am 22.10.2011 gegen 11:30 Uhr GMT aufgenommen. Die Scanrichtung wechselte ebenfalls zwischen den Aufnahmen. Dabei wurde jedoch anders als bei den Aufnahmen von München in allen drei Szenen der gleiche Ausschnitt von London aufgenommen. Die Abdeckungen der London-Szenen wurde in Tab. 3-3 aufgelistet und in Abb. 3-5 dargestellt.

<i>Bild</i>	<i>Kanal</i>	<i>Mitte der linken oberen Ecke in UTM-Koordinaten [m]</i>		<i>Bildgröße</i>	
		<i>Rechtswert</i>	<i>Hochwert</i>	<i>Spalten</i>	<i>Zeilen</i>
1,2,3	MS	696451.00	5722273.00	8615	10637
	PAN	696450.25	5722273.75	34460	42548

Tab. 3-3: Abdeckung der Satellitenbilder von London

Der Versatz der UTM-Koordinaten und die unterschiedlichen Zeilen- und Spaltenanzahlen von MS und PAN sind ebenfalls auf das Verhältnis der Auflösung von 2 m zu 0,5 m zurückzuführen.

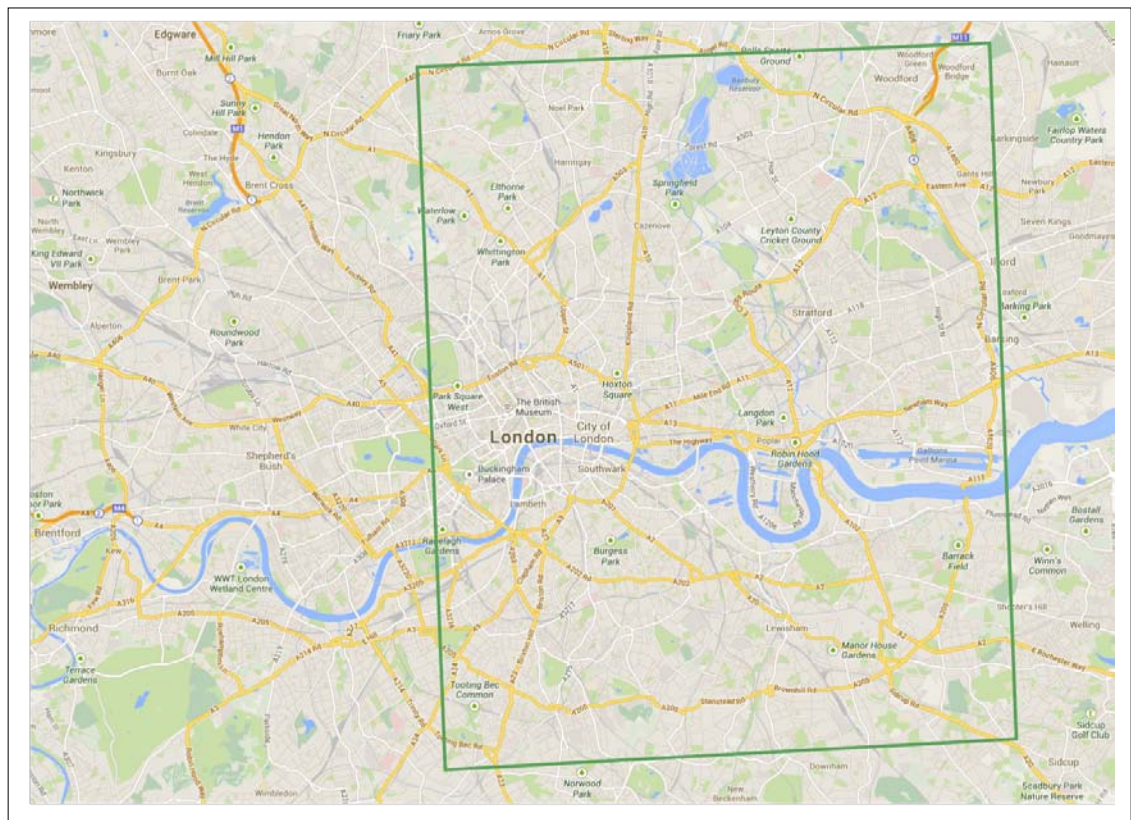


Abb. 3-5: Abdeckung der Satellitenbilder von London (GoogleMaps, 2013)



Die Aufnahmen der Szenen erfolgten zeitversetzt und unter verschiedenen Aufnahme-  
winkeln. Die exakten Aufnahmedaten sind der nachstehenden Tab. 3-4 zu entnehmen  
und wurden in der Abb. 3-7 graphisch dargestellt.

<i>London-Szene</i>	<i>Aufnahmezeitpunkt [GMT]</i>	<i>Scene Incidence</i>	<i>Scene Azimuth</i>
MS1	11:33:55,36	4,5°	343,3°
MS2	11:34:05,15	2,6°	262,7°
MS3	11:34:14,95	6,3°	217,3°

Tab. 3-4: Aufnahmedaten der London-Szenen

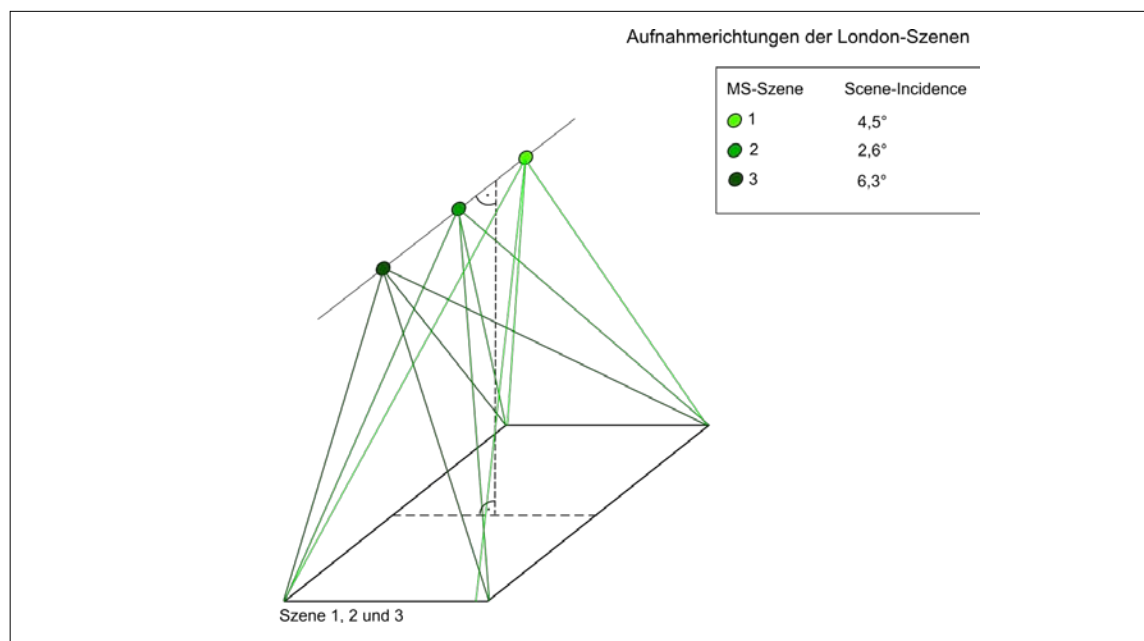


Abb. 3-6: Aufnahmerichtungen der London-Szenen

Beginnend mit der Aufnahme der Szene 1 in Flugrichtung des Satelliten schwenkte der Sensor zurück und nahm das gleiche Gebiet im Rückwärts-Scan erneut auf (Szene 2). Anschließend erfolgte die Aufnahme der Szene 3 wieder in Flugrichtung.

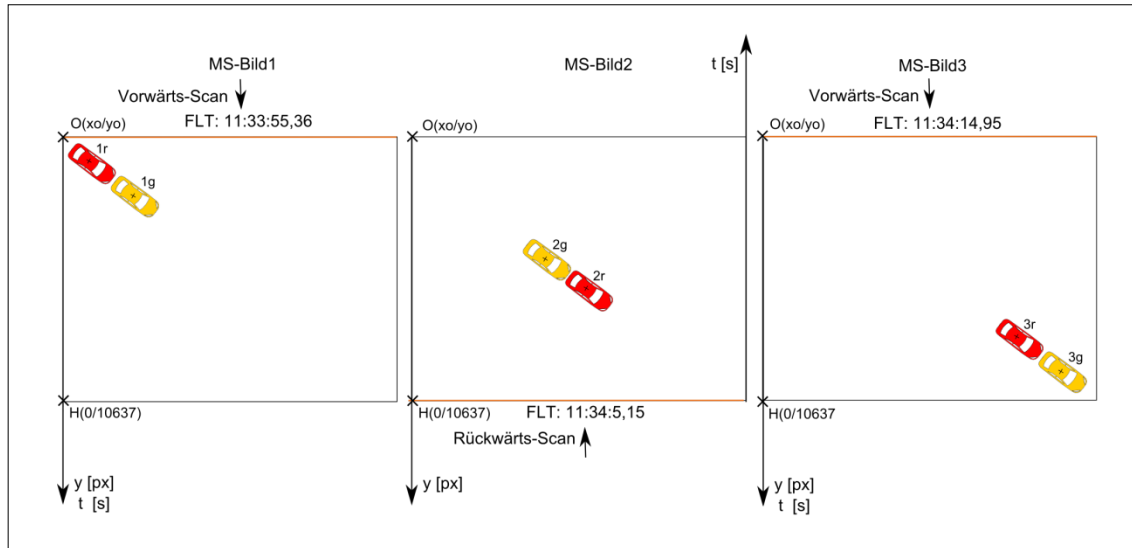


Abb. 3-7: Scanrichtung der London-Szenen

In nachstehender Abbildung werden sowohl die Scene-Incidence- als auch Scene-Azimuth-Winkel der München und London Szenen angezeigt. Dabei zeigt die Abb. 3-8 die Positionen des Satelliten und die Abweichungen zum Nadir.

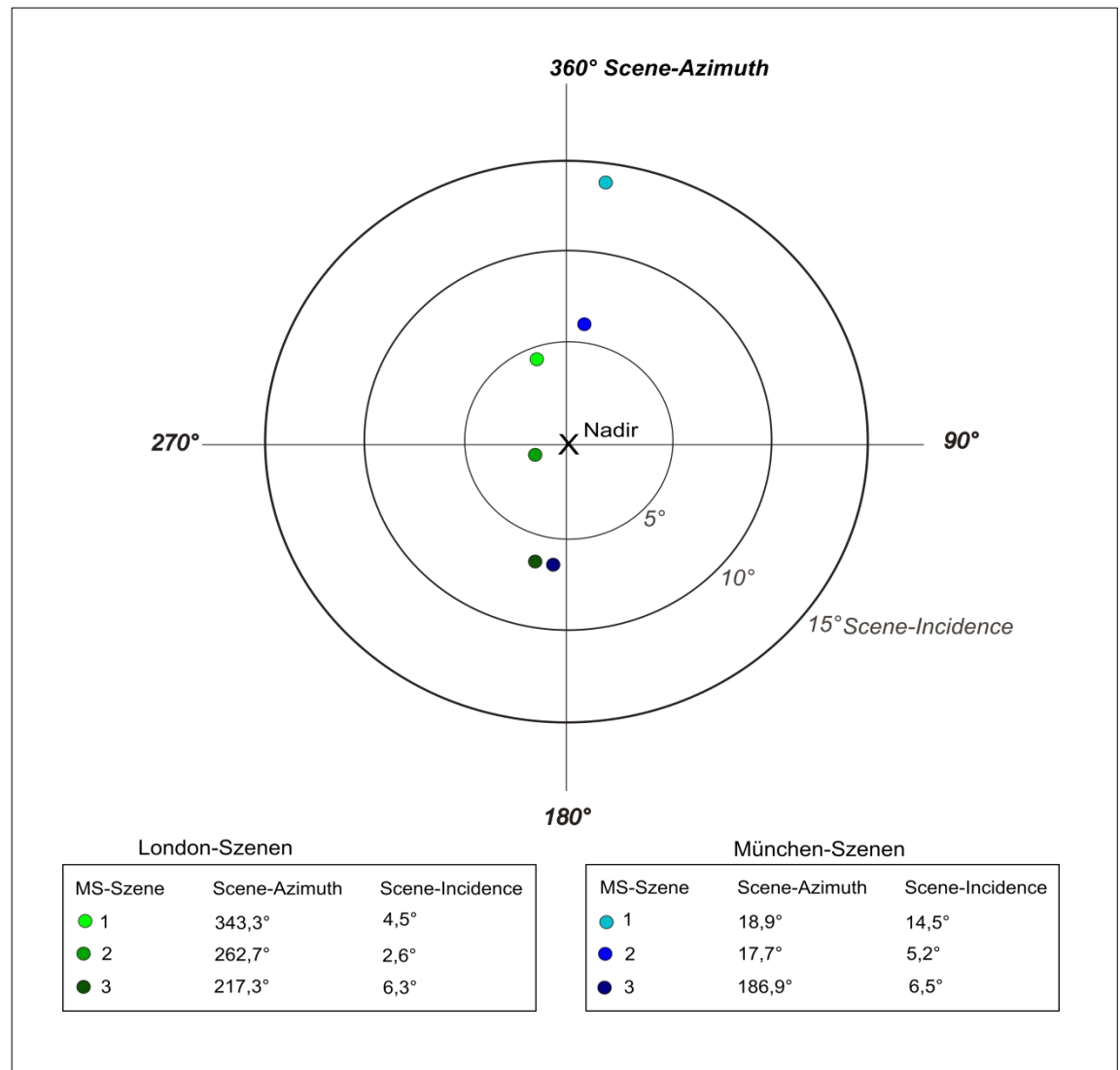


Abb. 3-8: Darstellung der Scene-Azimuth- und Scene-Incidence-Winkel der Satellitenbildszenen von München und London

---

## 4 Datenaufbereitung

---

### 4.1 Orthorektifizierung

Die bereits vorprozessierten Satellitenbilder liegen als Radianzen vor und werden in top-of-atmosphere (TOA) Reflektanzen, also das Verhältnis zwischen Ein- und Rückstrahlung in Prozent konvertiert. Diese Umrechnung bewirkt die Reduzierung des Blaustichs mit dem die Satellitenbilder versehen sind.

Da die Bilder in der Vorprozessierung durch DigitalGlobe nur auf eine einheitliche Ellipsoidhöhe projiziert wurden („Ortho-Ready“), ist es notwendig, eine genaue Orthorektifizierung vorzunehmen um die geländebezogenen Verzerrungen vollständig zu beseitigen. Dabei wird für jeden Punkt im Bild ein Sehstrahl berechnet, der anschließend mit dem Höhenmodell verschnitten wird.

Die vorhandenen digitalen Geländemodelle (DGM) von München und London liegen in Universal Transverse Mercator Projektion (UTM) vor und beziehen sich auf das geodätische Referenzsystem World Geodetic System 1984 (WGS 84), welches als einheitliche Grundlage für Positionsangaben auf der Erde dient. Mithilfe des XDibias Moduls *rpcortho* wird die Orthorektifizierung des Bildes auf das DEM (UTM) vorgenommen.

### 4.2 Bearbeitung der Testgebiete in XDibias

XDibias ist ein DLR-eigenes Bildverarbeitungsprogramm für die Bearbeitung von raster- und vektorbasierten Informationen. Sowohl die Aufbereitung der Satellitenbilder als auch die Kalibrier- und Fahrzeugmessungen werden in dieser Arbeit mithilfe von XDibias ausgeführt.

Das Bildverarbeitungsprogramm benutzt ein eigenes Dateiformat. Ein XDibias-Bild besteht aus einem Ordner, welcher mindestens die Datei `_img` (eigentliches Bild = Binärdatei) und die Datei `_aux` (Metadaten = Textdatei) enthalten muss.

Dieser Ordner wird im Laufe eines Projekts durch zusätzliche Dateien wie `_vec` (Vektordaten), `_prv` (Preview) und `_cpdb` (Korrelations-Datenbank) erweitert. Die `_cpdb` Datei entsteht, wenn Passpunkte zwischen einem Referenzbild und dem zu korrelierenden Bild gemessen werden. Die Messung von Korrelationspunktpaaren (Passpunkte) findet häufig ihre Anwendung bei der Entzerrung eines Bildes.

Dazu werden zwei Bilder getrennt geladen und nebeneinander im sogenannten Side-By-Side-Modus angezeigt (siehe Abb. 4-1). In dieser Arbeit wird die Aufnahme zum früheren Zeitpunkt  $T_1$  im linken Bild als Referenzbild geladen und die Aufnahme zum Zeitpunkt  $T_2$  im rechten Bild geladen.

Im Zuge dieser Arbeit wurden die Strecken der Fahrzeuge, welche diese von Bild zu Bild bzw. in einem Bild zurückgelegt haben, unter Verwendung dieses Modus gemessen.

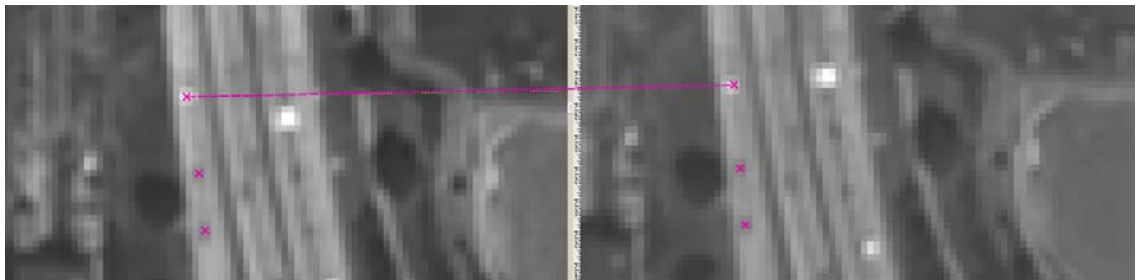


Abb. 4-1: Manuelle Fahrzeugerkennung im XDibias Side-By-Side-Modus

Das Bildverarbeitungsprogramm legt den Koordinatenursprung des Bildkoordinatensystems  $O(x_0, y_0)$  in die Mitte des linken oberen Pixels des Satellitenbildes. Die UTM-Koordinaten (RW, HW) für die Pixelmitte der oberen linken Bildecke  $(x_0, y_0)$  werden aus der `_aux`-Datei entnommen.

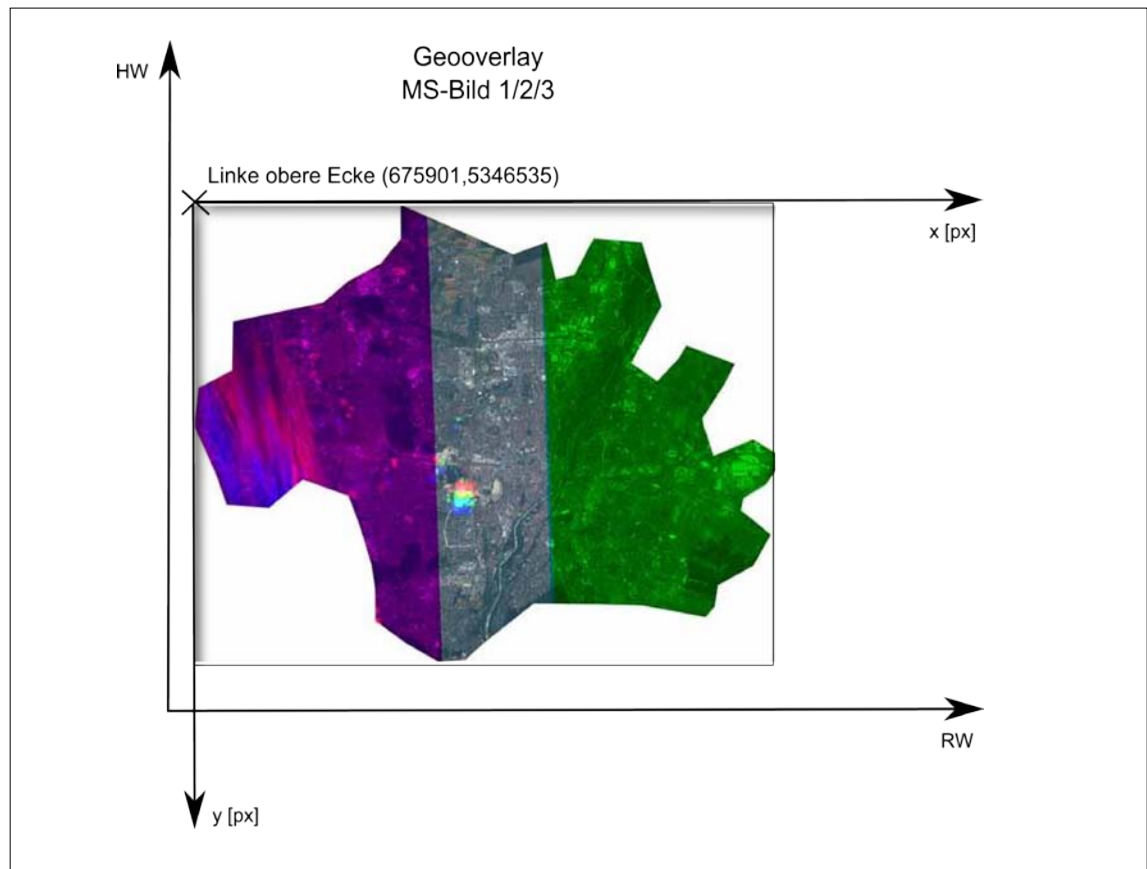


Abb. 4-2: Zusammenhang zwischen UTM- und Bildkoordinatensystem

### 4.3 Aufbereitung der Satellitenbildszenen München und London

Die Vorbereitung der Testgebiete der PAN- und MS-Aufnahmen findet separat statt. Zuerst werden aus den MS-Bildern von München mithilfe des XDibias Moduls *cutcoord* und unter Angabe der Pixelmitte der oberen linken Ecke, sowie Zeilen- und Spaltenanzahl des Überlappungsbereichs jeweils der gleiche Bildausschnitt erzeugt. Dieser Prozess ermöglicht den direkten Vergleich über die Bildkoordinaten der jeweiligen Ausschnitte und somit entfällt die Umrechnung auf UTM-Koordinaten.

Anschließend erfolgt die Anpassung der PAN-Bilder von München, die eine viermal höhere Auflösung als die MS-Bilder besitzen. Zur einfacheren Verarbeitung werden die Bilder 4-fach verkleinert, damit besitzen sie die geometrische Auflösung der MS-Bilder (2 m). Anders als die Multispektral-Aufnahmen werden die panchromatischen Aufnahmen nicht zurechtgeschnitten, da im Laufe der Kalibrierung ein Vergleich zwischen den

in MS und PAN gemessenen Fahrzeugen stattfindet, zu dem die UTM-Koordinaten jedes Fahrzeuges errechnet werden müssen.

In nachstehender Tabelle werden die Daten der erzeugten Bildausschnitte bezüglich ihrer geographischen Ausdehnung aufgelistet:

<i>Bild</i>	<i>Kanal</i>	<i>Mitte der oberen linken Ecke in UTM-Koordinaten [m]</i>		<i>Bildgröße</i>	
		<i>Rechtswert</i>	<i>Hochwert</i>	<i>Spalten</i>	<i>Zeilen</i>
1,2,3	MS	686517.00	5346535.00	2872	9715
1	PAN	675901.50	5346534.50	8205	9990
2	PAN	686483.50	5346038.50	8150	9736
3	PAN	675901.50	5346534.50	8124	9990

Tab. 4-1: Optimierte Abdeckung der Satellitenbilder von München

Die Multispektral-Aufnahmen von London decken jeweils den gleichen Bereich ab und werden unverändert zur Kalibrierung verwendet. Die entsprechenden PAN-Aufnahmen werden wieder 4-fach verkleinert und besitzen damit die gleiche Auflösung wie die MS-Aufnahmen (2 m). Daraus ergeben sich die nachfolgend aufgeführten Bildparameter:

<i>Bild</i>	<i>Kanal</i>	<i>Mitte der oberen linken Ecke in UTM-Koordinaten [m]</i>		<i>Bildgröße</i>	
		<i>Rechtswert</i>	<i>Hochwert</i>	<i>Spalten</i>	<i>Zeilen</i>
1,2,3	MS	675901.50	5346534.50	8205	9990
1,2,3	PAN	696451.50	5722272.50	8615	10637

Tab. 4-2: Optimierte Abdeckung der Satellitenbilder von London

## 5 Kalibrierung

Dieses Kapitel befasst sich mit der Kalibrierung der Zeitdifferenz zwischen den Arrays. Dabei wird zuerst geprüft, ob generell eine Zeitdifferenz zwischen allen Kanälen vorhanden ist oder ob die Erfassung der jeweiligen vier Kanäle innerhalb eines MS-Arrays synchron verläuft.

Dazu werden jeweils zwei einkanalige Bilder im Side-by-Side-Modus (siehe Kapitel 4.2) miteinander verglichen und identische Fahrzeuge vermessen. Die Bildkoordinaten der Messpunkte werden als Testdatensatz in einer `_cpdb`-Datei abgespeichert und anschließend in einer anderen Kanalkombination im Side-By-Side-Modus geladen.

Ein Zeitversatz zwischen der Aufnahme der Kanäle innerhalb eines Arrays würde bei einem bewegten Objekt zu einer Positionsveränderung führen. Folglich dürfen die in der `_cpdb`-Datei abgelegten Passpunkte nicht auf die identischen Fahrzeuge in anderen Kanalkombinationen passen. Um definitiv einen Zeitversatz innerhalb der MS-Arrays auszuschließen, werden folgende Kanalkombinationen in Vergleichsmessungen getestet:

<i>Array</i>	<i>Geladene Kanäle zur Fahrzeugmessung</i>	<i>Geladene Kanäle zum Vergleich</i>	<i>Ergebnis</i>
MS1 zu MS2	Rot, Gelb	Blau, Red Edge	Passgenau
MS1	Grün, Rot	Rot, Grün	– “ –
MS1	Rot, NIR1	Blau, Grün	– “ –
MS2	Gelb, NIR2	NIR2, Gelb	– “ –
MS2	Coastal Blue, Gelb	Red Edge, NIR2	– “ –

Tab. 5-1: Kanalkombinationen der Vergleichsmessungen um den Zeitversatz innerhalb der MS-Arrays auszuschließen

Die Ergebnisse zeigen eindeutig, dass sich die in einem Kanal gemessenen Passpunkte auf jeden Kanal des gleichen Arrays projizieren lassen, ohne dass sich die Position des Fahrzeugs bezüglich des Messpunkts verändert. Daraus lässt sich schließen, dass die



Zeitdifferenz zumindest händisch nicht messbar ist und daher entweder nicht existiert, oder nur sehr klein ist. Da die nachfolgend beschriebene Kalibrierung auch auf manuellen Messungen beruht, wird im folgenden Verlauf der Arbeit von einer synchronen Erfassung der Kanäle innerhalb jedes Arrays ausgegangen.

Aus diesem Grund können theoretisch zwei beliebige Kanäle aus dem MS1- und dem MS2-Array ausgewählt werden. Praktisch bietet sich jedoch an, auf die Kanäle Rot und Gelb zurückzugreifen, da diese das beste Kontrastverhältnis liefern.

Zur Kalibrierung der Zeitdifferenz zwischen den drei Arrays werden die aufbereiteten Satellitenbilder der Stadtgebiete München und London verwendet. Daraus werden wiederum Autobahnen ausgewählt, die sich durch ihre breiten Fahrspuren besonders gut zur Messung eignen. Das wichtigste Kriterium hierbei ist jedoch, dass nur auf geraden Autobahnabschnitten von einer annähernd konstanten Geschwindigkeit der Fahrzeuge über den Zeitraum der drei Bilder ausgegangen werden kann. Bei Autobahnen ist es vorteilhaft, dass keine angrenzende Bebauung mit störenden Schlagschatten vorhanden ist.

### 5.1 Manuelle Fahrzeugerkennung

Mittels des in Kapitel 4.2 genannten Side-by-Side-Modus werden die manuellen Messungen der Fahrzeuge durchgeführt. Dabei wird stets die durch ein Fahrzeug zurückgelegte Strecke innerhalb einer bestimmten Zeit gemessen. Es können jeweils nur zwei Bilder verglichen werden. Als Referenzbild wird jeweils ein Kanal des zum früheren Zeitpunkt aufgenommenen und für das korrelierende das zu einem späteren Zeitpunkt aufgenommene Satellitenbild geladen.

Die Messungen erfolgen innerhalb der MS-Bilder 1, 2 und 3 zwischen den Kanälen Rot und Gelb, sowie zwischen den Bildern 1-3, 1-2 und 2-3. Die Reihenfolge der Kanalanzahl ist abhängig von der Scan-Richtung des Bildes (siehe Abb. 3-4 und Abb. 3-7). Als Bezeichnung der Bilder werden die Bildnummer und der verwendete Kanal als Kleinbuchstabe festgelegt. Die Bezeichnungen 1r und 1g stehen somit für den Kanal Rot und den Kanal Gelb aus dem Bild 1.

Die Fahrzeuge werden wie Passpunkte behandelt; die Passkreuze werden mittig auf den Fahrzeugen platziert und die identischen Fahrzeuge in den beiden Bildern miteinander

über die `_cpdb`-Datei verknüpft. Die Reihenfolge der Fahrzeugmessung erfolgt willkürlich, da bei der Speicherung der Punkte die Relationen automatisch nach aufsteigender y-Koordinate des Referenzbildes sortiert werden. Die Datei beinhaltet lediglich die Bildkoordinaten  $[x,y]$  der gesetzten Passpunkte innerhalb des Bildpaares; ihr Aufbau ist der folgenden Abbildung zu entnehmen:

		Bildkoordinaten im Referenzbild x:1r	y:1r	Bildkoordinaten im Korrelationsbild x: 1g	y:1g
1	Object.Amount: 7				
2	z.0:	(1), 2, [ 2515.53,	3583.00], 2, [	2516.96,	3583.49]
3	z.1:	(2), 2, [ 2480.94,	3601.00], 2, [	2481.96,	3599.00]
4	z.2:	(3), 2, [ 2477.48,	3607.48], 2, [	2478.50,	3605.50]
5	z.3:	(4), 2, [ 2533.49,	3612.50], 2, [	2533.49,	3614.49]
6	z.4:	(5), 2, [ 2479.49,	3618.02], 2, [	2477.49,	3616.50]
7	z.5:	(6), 2, [ 2529.98,	3622.02], 2, [	2528.99,	3624.00]
8	z.6:	(7), 2, [ 2485.92,	3623.98], 2, [	2482.96,	3622.03]

Abb. 5-1: Aufbau einer `_cpdb`-Datei (correlation point database)

Die Verknüpfung der Kanäle und Bilder der Testgebiete München und London ist die gleiche; es ändert sich ausschließlich die Reihenfolge der Kanäle, welche durch die Scanrichtung bedingt ist. Insgesamt werden folgende drei Fahrzeug-Verknüpfungen mit der Side-by-Side Methode durchgeführt:

München:

- 1r-1g, 2r-2g und 3g-3r: zur Ermittlung der Stecke (s), welche das Fahrzeug zwischen dem roten und gelben Kanal zurückgelegt hat.

London:

- 1r-1g, 2g-2r und 3r-3g: zur Ermittlung der Stecke (s), welche das Fahrzeug zwischen dem roten und gelben Kanal zurückgelegt hat.

Aus den Ausgabe-Dateien können die restlichen `_cpdb`-Dateien abgeleitet werden. Dazu werden die gewünschten Koordinatenpaare in eine neue `_cpdb`-Datei extrahiert. Diese

Methode führt zu einer Minimierung des Messfehlers, da exakt die gleichen Koordinaten wieder verwendet werden.

Folgende Dateien werden daraus erstellt:

München:

- 1r-3g, 1r-2r und 2r-3g: zur Ermittlung der Strecke (S), welche das Fahrzeug zwischen den Bildern zurückgelegt hat.

Dabei liegt zwischen den MS1- und MS2-Aufnahmen eine Zeitdifferenz von 18,799 s und zwischen dem MS2- und MS3-Bild eine Differenz von 23,800 s

London:

- 1r-3r, 1r-2g und 2g-3r: zur Ermittlung der Strecke (S), welche das Fahrzeug zwischen den Bildern zurückgelegt hat.

Die Bilder MS1 und MS2 besitzen eine Differenz während der Aufnahme von 9,798 s und zwischen dem MS2 und MS3 liegt eine Zeitdifferenz von 9,800 s

Insgesamt werden zu Kalibrierzwecken in den München MS-Szenen 14 Fahrzeuge auf dem Abschnitt der A99 vermessen, welcher in allen drei Szenen enthalten ist. In den München PAN-Szenen werden 12 bewegte Objekte markiert. Für die Kalibrierung von London werden 49 Fahrzeuge in den MS-Szenen und 10 Fahrzeuge in den PAN-Aufnahmen erfasst. Die Messungen des Testgebiets London erfolgen auf das ganze Satellitenbild verteilt.

## 5.2 Ableitung von Verkehrsparametern

Die Bildkoordinaten [x,y] der gemessenen Fahrzeuge werden aus den \_cpdb-Dateien in das Tabellen-Kalkulationsprogramm Excel übertragen. Die Berechnung der verkehrsrelevanten Parameter erfolgt über eigens erstellte Excel-Auswertetabellen.

Da der Rechenweg für die Zeitkalibrierung aus den Multispektralaufnahmen von München und London identisch ist, wird er nur einmal beschrieben. Die Formeln beziehen sich auf München und somit auf die Messungen innerhalb der Bilder von 1r-1g, 2r-2g,

3g-3r und auf die daraus abgeleiteten Verknüpfungen zwischen den Bildern von 1r-3g, 1r-2r und 2r-3g.

Das Beispiel wird für München anhand der Messung zwischen 1r-3g aufgezeigt, deren Bildkoordinaten verallgemeinert als  $(x_1, y_1)$  und  $(x_3, y_3)$  bezeichnet werden. Aufgrund des Wechsels der Scanrichtung in Bild 3 erfolgt die Aufnahme zuerst im gelben Kanal und anschließend im roten Kanal, deshalb findet die Messung nicht zwischen 1r-3r, sondern zwischen 1r-3g statt. Die FLT des jeweiligen Bildes und die Zeit, die der Scanner zur Aufnahme einer Zeile benötigt, sind bekannt. Zur Berechnung der Geschwindigkeit der einzelnen Fahrzeuge sind nachfolgende Zwischenschritte notwendig.

Zuerst erfolgt die Berechnung der Differenzen  $\Delta x$  und  $\Delta y$  der Bildkoordinaten zwischen 1r und 3g. Dann ergibt sich für die Strecken in x- und y-Richtung:

$$\Delta x_{1-3} = x_3 - x_1$$

$$\Delta y_{1-3} = y_3 - y_1$$

Mit diesen Werten kann die Berechnung der durch das Fahrzeug zurückgelegten Strecke von 1r nach 3g erfolgen. Die Multiplikation mit dem Faktor 2 [m] (entspricht der geometrischen Auflösung der MS-Bilder) ergibt die Umrechnung von Pixel in Meter.

$$S_{1-3} = (\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}) * 2 \text{ [m]}$$

Anschließend wird die Ermittlung der exakten Aufnahmezeitpunkte aller vermessenen Fahrzeuge sowohl in 1r als auch in 3g durchgeführt. Hier wird die Scanrichtung und FLT benötigt, die bereits in Kapitel 4 erläutert und in Abb. 3-4 und Abb. 3-7 dargestellt wurden. Für die Bestimmung der Aufnahmezeitpunkte der Fahrzeuge im Rückwärts-Scan wird zusätzlich die Bildhöhe  $h$  in Pixel gebraucht, da das Bildkoordinatensystem seinen Ursprung  $(x_0, y_0)$  (wie in Abb. 4-2) in die Mitte der oberen linken Ecke legt, jedoch die Zeit mit abnehmender Y-Koordinate und nicht wie im Vorwärts-Scan mit zunehmender Y-Koordinate steigt.

Da 1r im Vorwärts- und 3g im Rückwärts-Scan aufgenommen wurden, ergeben sich nachstehende Formeln zur Berechnung der Aufnahmezeitpunkte der Fahrzeuge, die FLT ist aus der Tab. 5-2 zu entnehmen.

$$\text{Vorwärts-Scan: } t_1 = FLT_1 + y_1 * \Delta t_l$$

$$\text{Rückwärts-Scan: } t_3 = FLT_3 + (h - y_3) * \Delta t_l$$

$$\text{mit: } \Delta t_l = \frac{1}{3000} s$$

<i>Testgebiet</i>	<i>Bild</i>	<i>First Line Time [GMT]</i>
München	MS1	10:29:57,79
- “ -	MS2	10:30:16,59
- “ -	MS3	10:30:40,39
London	MS1	11:33:55,36
- “ -	MS2	11:34:05,15
- “ -	MS3	11:34:14,95

Tab. 5-2: First Line Time der MS-Bilder der Testgebiete München und London

Damit ergibt sich für die Zeitdifferenz  $\Delta t_{1-3}$  zwischen MS1 und MS3

$$\Delta t_{1-3} = t_3 - t_1$$

und mit der Strecke  $S_{1-3}$  wird die Geschwindigkeit der Fahrzeuge abgeleitet. Zur Umrechnung von  $\frac{m}{s}$  in  $\frac{km}{h}$  wird das Ergebnis mit dem Faktor 3,6 multipliziert.

$$V_{1-3} = \frac{S_{1-3}}{\Delta t_{1-3}} * 3,6 \left[ \frac{km}{h} \right]$$

Die Kalibrierung beruht auf der Annahme einer konstanten Geschwindigkeit der Fahrzeuge über die Aufnahmen 1r-3g. Daraus kann folgende Gleichung aufgestellt werden:

$$V = \text{konstant}$$

$$V_{1-3} = V_{1-2} = V_{2-3} = v_{1r-1g} = v_{2g-2r} = v_{3r-3g}$$

$$V_{1-3} = v_{1r-1g}$$

$$\frac{S_{1-3}}{\Delta t_{1-3}} = \frac{S_{1r-1g}}{\Delta t_{1r-1g}}$$

$$\Delta t_{1r-1g} = \frac{S_{1r-1g}}{S_{1-3}} * \Delta t_{1-3}$$

$\Delta t_{1r-1g}$  definiert die gesuchte Zeitdifferenz zwischen den Kanälen Rot (r) und Gelb (g) und somit auch die Zeitdifferenz zwischen den MS1 und dem MS2-Arrays.

Der einzige unbekannte Parameter ist nunmehr noch die zurückgelegte Strecke des Fahrzeugs zwischen den Kanälen Rot und Gelb.

Hier wird aus den Koordinaten der Messungen 1r-1g, 2r-2g und 3g-3r die zurückgelegte Strecke wie folgt ermittelt:

$$\Delta x_{1r-1g} = x_{1g} - x_{1r}$$

$$\Delta y_{1r-1g} = y_{1g} - y_{1r}$$

$$S_{1r-1g} = (\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}) * 2 \text{ [m]}$$

Diese Berechnungen werden für alle drei Messreihen durchgeführt; als Ergebnis liegen drei Werte vor. Da von einer konstanten Bewegung des Fahrzeuges ausgegangen wird und die Zeitdifferenz der Kanäle gleich bleibt, ergibt sich eine einheitliche Distanz, welche das Fahrzeug innerhalb dieser Zeit zurückgelegt hat. Diese direkte Abhängigkeit erlaubt somit einen Vergleich der Ergebnisse.

An dieser Stelle wird zur Fehlerminimierung als Bedingung eingeführt: Bei Abweichungen der Strecken  $S_{1r-1g}$  und  $S_{3r-3g} > 0,5 \text{ m}$  werden die Messpunkte aus der Auswertung entfernt und somit nicht weiter verwendet, da dies auf eine Geschwindigkeitsänderung zwischen den Bildern hindeutet und somit die Annahme gleichförmiger Geschwindigkeit nicht mehr gilt.

Liegen die Abweichungen innerhalb dieser Toleranz, wird das arithmetische Mittel aus den zwei gemessenen Strecken zwischen den Kanälen der jeweiligen Bilder berechnet und zur Weiterberechnung verwendet. Es wird wie folgt berechnet:

$$\bar{S}_{r-g} = \frac{S_{1r-1g} + S_{3r-3g}}{2}$$

Da nun alle Parameter der bereits oben aufgeführten Formel bekannt sind, kann für jedes gemessene Fahrzeug die Zeitdifferenz zwischen dem MS1 und dem MS2-Array, unter Benutzung des folgenden Ausdrucks ermittelt werden:

$$\Delta t_{1r-3g} = \frac{\bar{S}_{r-g}}{S_{1r-3g}} * \Delta t_{1-3}$$

Abschließend erfolgt eine Mittelwertbildung und die Berechnung der empirischen Standardabweichung  $\sigma$  aller berechneten  $\Delta t$ .

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta t_i - \bar{\Delta t})^2}$$

Als Ergebnisse der Kalibrierung werden die in Tab. 5-3 aufgeführten Zeitdifferenzen erhalten.

<i>Testgebiet</i>	<i>Array</i>	<i>Zeitdifferenz <math>\Delta t</math> [s]</i>	<i>Standardabweichung <math>\sigma</math> [s]</i>	<i>Anzahl <math>n</math> der Fahrzeuge</i>
München	MS1-MS2	0,28289	0,01763	14
London	MS1-MS2	0,28548	0,07	49

Tab. 5-3: Ergebnisse zur Kalibrierung der Zeitdifferenz  $\Delta t$  zwischen dem MS1- und MS2-Array

Für die anschließenden Messungen wurde das Ergebnis auf [ms] gerundet. Somit ergibt sich für München ein  **$\Delta t = 0,283 \text{ s} \pm 0,018 \text{ s}$**  und für das Testgebiet London liegt die **Zeitdifferenz bei  $\Delta t = 0,285 \text{ s} \pm 0,070 \text{ s}$** .

Wie aus den Ergebnissen entnommen werden kann, liegen die gemessenen Mittelwerte von  $\Delta t$  innerhalb der errechneten Standardabweichung.

### 5.3 Fehlerberechnung

Zur Untersuchung der Messgenauigkeit in Bezug auf die manuelle Fahrzeugerfassung, wurden alle bereits erfassten Fahrzeuge in einer zweiten Messreihe noch einmal händisch gemessen. Betrachtet wurden anschließend die Abweichungen aller x- und y-Bildkoordinaten zwischen den beiden Messreihen. Für jedes Fahrzeug erfolgte eine gesonderte Berechnung der Standardabweichung für seine x- und y-Position.

Diese Analyse wurde für alle Bilder durchgeführt. Anschließend erfolgte die Mittelwertbildung aller Standardabweichungen pro Satellitenaufnahme, wobei sich die nachstehend aufgeführten Werte für die Standardabweichung der manuellen Fahrzeugerfassung ergaben.

<i>Testgebiet</i>	<i>Kanal</i>	<i>Standardabweichung [px]</i>			<i>Anzahl n der Fahrzeuge</i>
		<i>MS1</i>	<i>MS2</i>	<i>MS3</i>	
München	MS	0,09	0,1	0,19	14
London	MS	0,12	3,45	1,71	49

Tab. 5-4: Empirische Standardabweichungen der Testgebiete

Insgesamt ergibt sich daraus eine gemittelte Standardabweichung von 0,943 Pixel, die bei der Auflösung von 2 m eine Messungenauigkeit von 1,887 m darstellt. Alle Messwerte, die außerhalb der Messungenauigkeit lagen, wurden markiert und getestet wie sich das Ergebnis ohne sie verändert.



Bedingt durch die mittige Platzierung des PAN-Arrays zwischen den MS1- und MS2-Arrays muss sich theoretisch auch die Zeitdifferenz zwischen MS1 und MS2 halbieren. Um diese Theorie zu bestätigen, mussten weitere Strecken gemessen werden. Dabei wurden die bereits zur Kalibrierung zwischen MS1 und MS2 verwendeten \_cpdb Dateien zwischen den Kanälen Rot und Gelb innerhalb eines Bildes verwendet und jeweils nur der Referenzpunkt auf der Seite, auf welcher das PAN-Bild geladen wurde, verschoben. Diese Vorgehensweise führt wiederum zu einer Fehlerminimierung, da die Autos innerhalb des gleichen Kanals nicht doppelt gemessen werden. Folgende Korrelationsmessungen wurden wieder im Side-By-Side-Modus ausgeführt:

München:

- 1r-1PAN, 1PAN-1g, 2g-2PAN, 2PAN-2r und 3r-3PAN und 3PAN-3g: zur Ermittlung der Strecke (s), welche das Fahrzeug zwischen dem roten und dem panchromatischen bzw. zwischen dem gelben und dem panchromatischen Kanal zurückgelegt hat.

London:

- 1r-1PAN, 1PAN-1g, 2r-2PAN, 2PAN-2g und 3g-3PAN, 3PAN-3r: zur Ermittlung der Strecke (s), welche das Fahrzeug zwischen dem roten und dem panchromatischen bzw. zwischen dem gelben und dem panchromatischen Kanal zurückgelegt hat.

Die Berechnung zur Ermittlung der Zeitdifferenzen  $\Delta t$  zwischen dem MS1- und dem PAN-Array, sowie zwischen dem PAN- und dem MS2-Array erfolgt unter Verwendung der gleichen Formeln, mit welchen auch die Bestimmung der Zeitdifferenz  $\Delta t$  zwischen dem roten und dem gelben Kanal durchgeführt wurde. Die in Kapitel 4.2 4.3 aufbereiteten MS-Szenen (2 m) und die verkleinerten PAN-Szenen (2 m) von München und London dienen als Grundlage.

Einziger Unterschied hierbei ist, dass die aus den \_cpdb-Dateien entnommenen Bildkoordinaten in UTM-Koordinaten umgerechnet werden, über welche dann die Berechnung der Strecken stattfindet.

Der Grund hierfür liegt darin, dass die PAN-Aufnahmen eine andere linke obere Ecke besitzen und somit die Beziehung zwischen dem MS- und dem PAN-Bild erst nach Umrechnung der Bildkoordinaten in UTM-Koordinaten hergestellt werden konnte.

Zur Berechnung der Landeskoordinaten ( $RW_1, HW_1$ ) der gemessenen Fahrzeuge wurden folgende Gleichungen verwendet, dabei definieren die UTM-Koordinaten ( $RW_0, HW_0$ ) den Ursprung des Satellitenbildes und  $\Delta xy$  ist die geometrische Auflösung von 2 m.

$$RW_1 = (x * \Delta xy) + RW_0$$

$$HW_1 = HW_0 - (y * \Delta xy)$$

In der Auswertung wurde eine Abweichung von 0,5 m für die Mittelwerte der Strecken zugelassen. Ergebnisse, die außerhalb dieser Toleranzgrenze lagen, wurden nicht in die Berechnungen mit einbezogen. Durch die Mittelwertbildung aller Zeitdifferenzen ergab sich für die Testgebiete die in Tab. 5-5 aufgeführten Zeitdifferenz  $\Delta t$  zwischen den MS1-, PAN- und MS2-Arrays.

<i>Testgebiet</i>	<i>Array</i>	<i>Zeitdifferenz <math>\Delta t</math> [s]</i>	<i>Standardabweichung [s]</i>
München	MS1-PAN	0,1504	0,0046
	PAN-MS2	0,1413	0,0162
London	MS1-PAN	0,1804	0,0440
	PAN-MS2	0,1536	0,0389

Tab. 5-5: Ergebnisse zur Kalibrierung der Zeitdifferenz  $\Delta t$  zwischen den MS1-, PAN- und MS2-Arrays

---

## 6 Kartographische Visualisierung

---

Allgemein geben Verkehrskarten Objekte und Sachverhalte des Verkehrswesens wieder. Zu unterscheiden sind Karten für den Verkehr und Karten über den Verkehr. Erstere dienen zur Durchführung und Sicherung des Verkehrsvorgangs, wohingegen der zweite Kartentyp zur verkehrstechnischen, -ökonomischen und -geographischen Darstellung des Verkehrsgeschehens verwendet wird. Da in den im Rahmen dieser Arbeit erstellten kartographischen Produkten das Verkehrsgeschehen erfasst wird, zählen diese zu den Karten über den Verkehr (mr-kartographie, 2010).

### 6.1 Fahrzeugmessung und Geschwindigkeitsberechnung

Die Positionsmessungen erfolgen in dem am 12.07.2010 um 10:29:57 Uhr GMT aufgenommenen Satellitenbild von München zwischen den Kanälen Rot und Gelb. Mittels des Side-by-Side-Werkzeugs werden 2312 Fahrzeuge auf Münchens wichtigsten Verkehrsadern (Bundesautobahnen und innerstädtische Straßen) erfasst. Dabei wird sowohl für jede Straße getrennt nach den Fahrtrichtungen, als auch für die Fahrzeuge auf Autobahnaus- und -auffahrten eine eigene \_cpdb-Datei erstellt. Alle vermessenen Fahrzeuge werden in Abb. 6-1 angezeigt.



Abb. 6-1: Alle gemessenen Fahrzeuge des MSI-Bildes von München

## 6.2 Verkehrsflusskarte

Die Koordinaten der Fahrzeuge werden in Excel übertragen und in drei verschiedene Tabellen nach ihrer Straßenkategorie aufgeteilt. Für Autobahnen, Bundesstraßen und sonstige Straßen wurde unter Verwendung der in Kapitel 5 ermittelten Zeitdifferenz die Geschwindigkeit für jedes Fahrzeug berechnet.

$$v_{1r-1g} = \frac{s_{1r-1g}}{\Delta t_{1r-1g}}$$

Innerhalb der Berechnungstabellen werden die Koordinaten je nach Straßenart, Straßennamen und Fahrtrichtung aufgelistet und ihre Geschwindigkeiten vermerkt. Um den Verkehrsfluss darzustellen soll für jede gebildete Gruppe die Durchschnittsgeschwindigkeit der Fahrzeuge berechnet werden. Davor wird jedoch für jeden Straßentyp eine Mindestgeschwindigkeit festgelegt; fuhr ein Fahrzeug langsamer, wird es innerhalb der Excel-Tabelle markiert.

Der Grund für diese Segmentierung ist zum einen, dass häufig auch am Straßenrand abgestellte Fahrzeuge erfasst wurden, da sie nicht als solche identifiziert werden konnten, und zum anderen, dass die Fahrzeuggeschwindigkeiten auf den Straßen häufig aufgrund von Staubildungen an Kreuzungen, Ausfahrten, Auffahrten und Tunneleinfahrten variierte.

Die festgelegte Mindestgeschwindigkeit für Autobahnen beträgt dabei  $60,5 \frac{km}{h}$ ; für alle anderen Straßen erfolgt erst eine Markierung unterhalb einer Geschwindigkeit von  $20,5 \frac{km}{h}$ . Die Werte bilden jeweils die Grenzen zwischen zwei Geschwindigkeitsgruppen und wurden straßentypgerecht ausgewählt; sie geben an, ab welcher Geschwindigkeit ein Fahrzeug als langsam gilt.

Anschließend erfolgt die Durchsicht aller markierten Fahrzeuge mit dem Ziel, die Ursache der Geschwindigkeitsänderung festzustellen. Handelt es sich lediglich um ein einzelnes langsames Fahrzeug, wurde dies nicht weiter beachtet, da es entweder ein parkendes oder ein abbiegendes Fahrzeug ist. Es wird in die Berechnung der Durchschnittsgeschwindigkeit des Fahrstreifenabschnitts nicht mit einbezogen. Sind mehrere hintereinander fahrende Fahrzeuge markiert, die aufgrund einer Staubildung mit verminderter Geschwindigkeit fahren, wird für den betroffenen Linienzug, dessen Länge

sich aus den Positionen der verlangsamten Fahrzeuge ergibt, eine eigene Durchschnittsgeschwindigkeit berechnet. In der nachfolgenden Tabelle wird der Aufbau der Excel Tabellen anhand der Ausfahrt A99 Richtung West gezeigt (siehe Abb. 6-2).

		Kanal											
		Rot		Gelb									
Autobahn	Punkt Nr.	xI	yI	xI	yI	delta_x	delta_y	S_I-I [pixel]	S_I-I [m]	v [pixel/s]	v [km/h]	Aus-reisser	Mittleres v [km/h]
A99 Aus-fahrt/West	1	6468,48	865,23	6468,39	861,04	0,09	4,19	4,19	8,38	14,81	106,66		105,23
	2	6466,52	885,54	6467,47	881,57	0,95	3,97	4,08	8,16	14,43	103,89		
	3	6462,46	904,54	6463,33	901,4	0,87	3,14	3,26	6,52	11,52	82,93		
	4	6448,01	963,77	6448,99	960,01	0,98	3,76	3,89	7,77	13,73	98,89		
	5	6365,44	1081,54	6365,44	1081,52	0	0,02	0,02	0,04	0,07		X	
	6	6267,24	1099,43	6270,44	1099,94	3,2	0,51	3,24	6,48	11,45	82,47		
	7	6203,18	1078,51	6205,86	1079,52	2,68	1,01	2,86	5,73	10,12	72,89		
	8	6156,99	1046,99	6163,01	1044,73	6,02	2,26	6,43	12,86	22,73	163,65		
	9	6059,53	1073,26	6064,5	1072	4,97	1,26	5,13	10,25	18,12	130,49		

Abb. 6-2: Auszug aus der Excel-Tabelle mit den mittleren Geschwindigkeiten

Zur kartographischen Aufbereitung der Daten wird das orthorektifizierte Satellitenbild, in dem auch die Fahrzeugmessungen erfolgten, als Hintergrund verwendet. Dazu wird es in das Grafikprogramm OCAD geladen, unter dessen Verwendung die Erstellung der Verkehrsflusskarte erfolgt. Da das Grafikprogramm zum Erstellen von Karten wesentlich geeigneter ist, als das Bearbeitungsprogramm XDibias, wird OCAD zur Generierung der Verkehrsflusskarte verwendet. Es besitzt neben den Standard-Zeichenfunktionen die Möglichkeit zum Anlegen von Symbolsätzen sowie zum Import und Bearbeiten von Rastergrafiken und GPS-Daten. Neben traditionellen Karten ist auch die Option zur Erstellung von interaktiven Internetkarten vorhanden (OCAD, 2013).

Die Karte ist vereinfacht grafisch dargestellt und damit leicht verständlich. Sie dient zur Visualisierung der gewonnenen Geschwindigkeiten und zeigt welche Verkehrsinformationen aus einem mittels Pushbroom-Scanner aufgenommenen Satellitenbild abgeleitet werden können. Anhand der Karte wird die Bedeutung der kalibrierten Zeitdifferenz

gezeigt, da mittels nur eines Satellitenbildes die Verkehrslage innerhalb einer ganzen Stadt wie München zu einem bestimmten Zeitpunkt dargestellt werden kann.

Das Satellitenbild dient als Basiskarte der thematischen Karte. Durch die geometrische Auflösung von 2 m werden die Objekte in verminderter Qualität abgebildet und die Lesbarkeit beeinträchtigt. Deshalb kann keine detailgetreue und lagerichtige Darstellung des Straßennetzes erfolgen, daher werden die Linienzüge generalisiert. Für die Lesbarkeit der Karte ist eine Vergrößerung der Straßen notwendig, dabei hat die Verbreiterung der Signaturen die Verdrängung des Geländes zur Folge. Daraus ergeben sich zwangsweise Widersprüche, da die an Straßen angrenzende Bebauung teilweise von der Straße eingenommen wird. Die Linienbreite der Straßen gibt Aufschluss über den Straßentyp, dabei wurde nur zwischen Autobahnen und innerstädtischen Straßen unterschieden und die Farbe steht für die mittlere Geschwindigkeit der in diesem Straßenabschnitt befindlichen Fahrzeuge.

Unter Verwendung des Symboleditors werden Liniensymbole für die einzelnen Straßentypen angelegt und je nach der vordefinierten Farbe eingefärbt, welche die errechnete Durchschnittsgeschwindigkeit repräsentiert; die Längen der einzelnen Straßenabschnitte ergibt sich jeweils aus den Positionen der jeweils an dieser Geschwindigkeitsgruppe beteiligten Fahrzeuge. Die berechneten Durchschnittsgeschwindigkeiten werden in Gruppen eingeteilt, welchen jeweils eine eigene Farbe nach dem Vorbild der ADAC-Verkehrsflusskarte zugeteilt wird.

Dabei wird ein Farbverlauf nach Art des Ampelsystems verwendet, welches von Rot über Orange und Gelb nach Grün reicht. Der Name leitet sich aus der Tatsache ab, dass bei Rot angehalten werden muss und bei Grün gefahren werden darf. Demnach wird der Geschwindigkeitsgruppe mit der höchsten Durchschnittsgeschwindigkeit die Farbe Dunkelgrün und der niedrigsten die Farbe Dunkelrot zugeteilt. Die Geschwindigkeitseinteilung ist folgender Abbildung zu entnehmen:

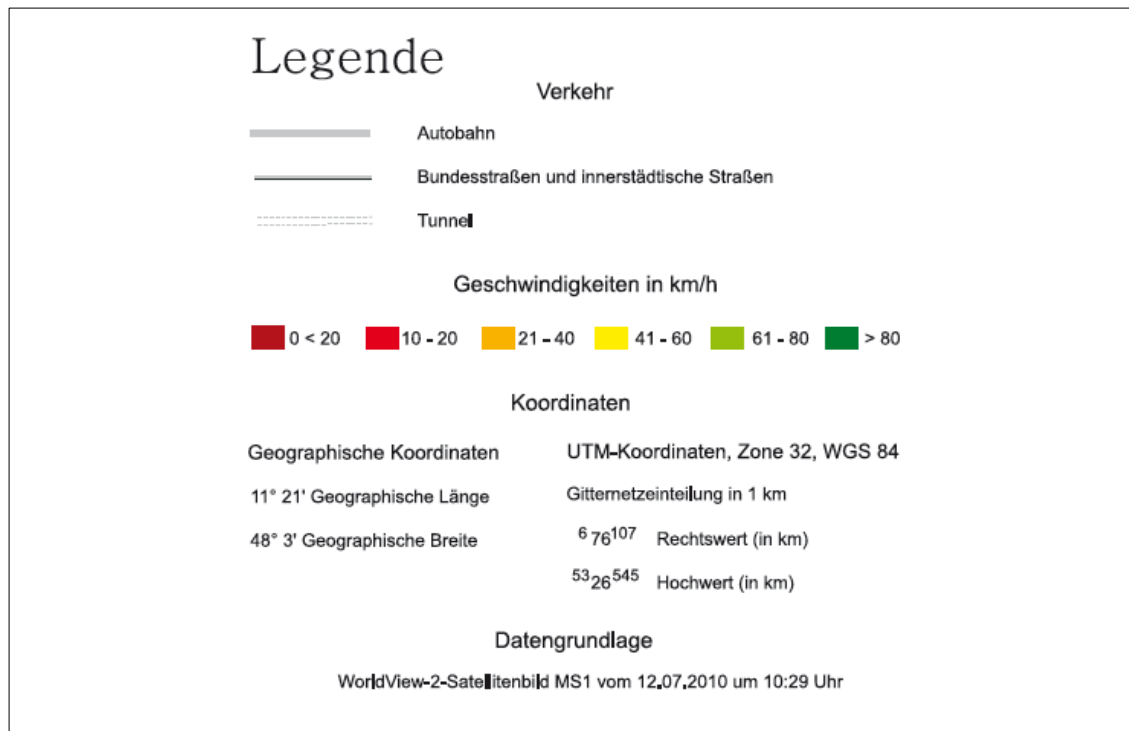


Abb. 6-3: Legende der Verkehrsflusskarte von München

Für Grenzfälle wurde die Durchschnittsgeschwindigkeit jeweils auf ganze Zahlen gerundet.

### 6.3 Geschwindigkeitskarte

Datengrundlage bildeten die bereits sortierten `_cpdb`-Dateien, welche auch für die Verkehrsflusskarte verwendet wurden. Mithilfe eines AWK-Programms erfolgte die Umwandlung der Pixelkoordinaten in UTM-Koordinaten. „AWK“ ist eine Scriptsprache, die zur Tabellen- und Textverarbeitung unter LINUX verwendet wird. AWK steht für die Autoren A. Aho, P. Weinberger und B. Kernighan.

Aus den Fahrzeugmessungen werden mithilfe einer zweiten AWK-Routine und dem bekannten Zeitfaktor, der kalibrierten Zeitdifferenz für München  $\Delta t = 0,283$  s, die Fahrzeuggeschwindigkeiten ermittelt. Dazu werden die Formeln in Kapitel 5.2 verwendet. Aus den gewonnenen Verkehrsparametern wurde anschließend eine Vektordatei abgeleitet, in der jedes Fahrzeug durch eine farbige Signatur dargestellt wurde. Die Farbgebung der Signaturen erfolgte nach vordefinierten Farbgruppen. Mithilfe von OCAD wird das Kartenlayout erstellt.

### 6.4 Farbwahl

Für diese Geschwindigkeitsdarstellung wurde ebenfalls eine Farbgebung nach dem Ampelsystem gewählt. Die ermittelten Geschwindigkeiten werden in acht Gruppen unterteilt, dabei sind zusätzlich drei Gruppen zur Unterscheidung der Autobahngeschwindigkeiten von mehr als  $80 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  hinzugekommen. Die Einteilung erfolgte auch hier in  $20 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  Schritten. Die zur Darstellung der Fahrzeuge eingefärbten Signaturen wurden innerhalb des AWK-Programms definiert; dabei wurden mehrere verschiedene Varianten getestet.



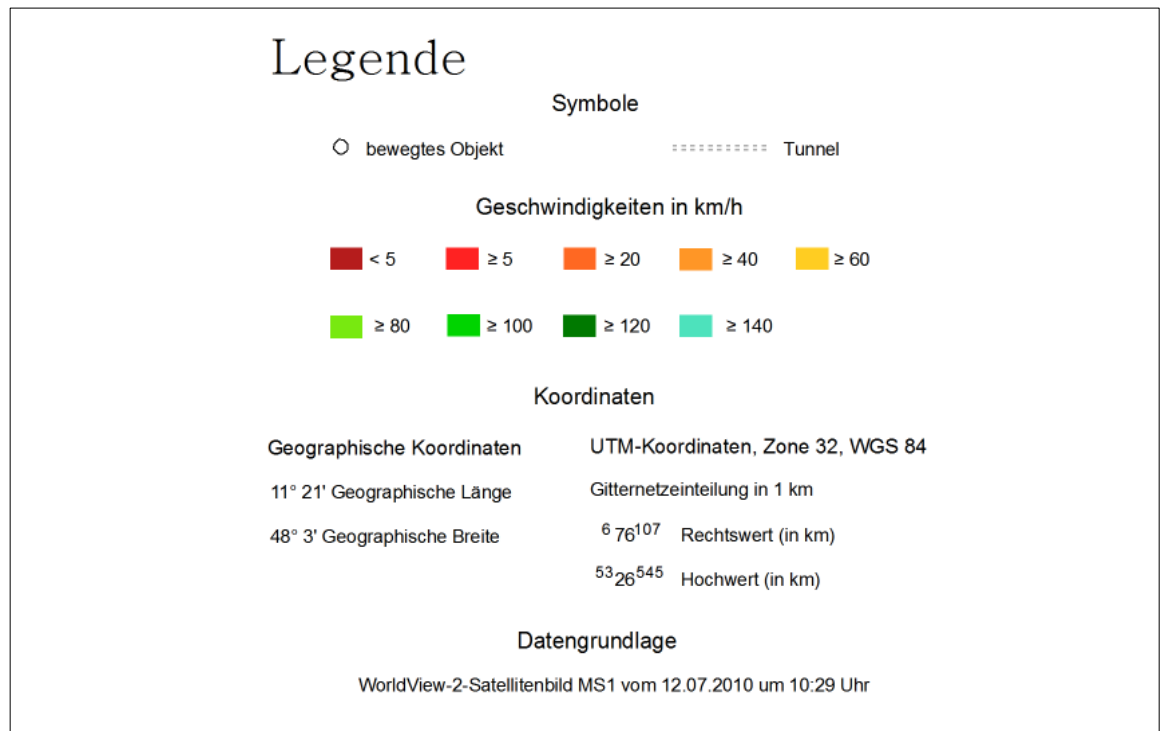


Abb. 6-4: Legende der Geschwindigkeitskarte von München

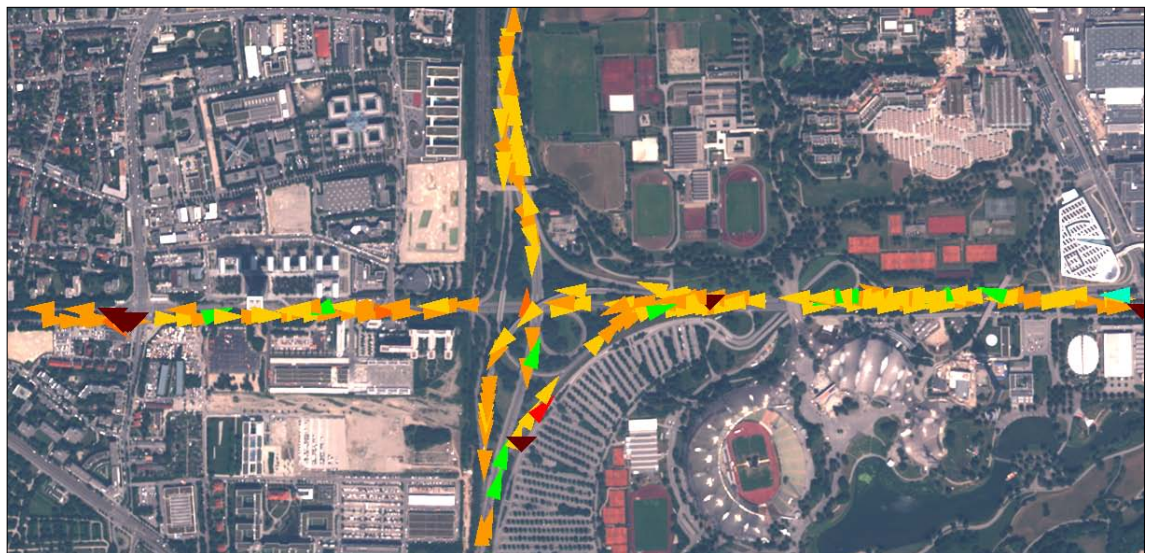
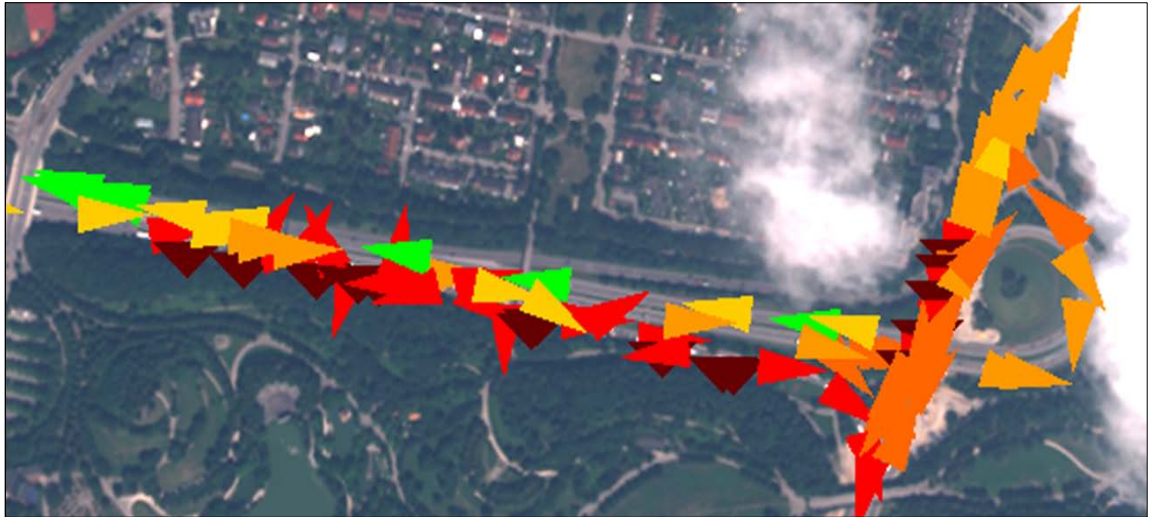


Abb. 6-5: Darstellung der Fahrzeuggeschwindigkeiten durch Pfeilsignaturen

Mithilfe der Dreieck-Signatur, in der jedes Fahrzeug durch ein gleichseitiges Dreieck repräsentiert wurde, war es möglich die Richtung der Fahrzeuge innerhalb der Karte darzustellen. Da das Programm jedoch die jeweils durch das Fahrzeug zurückgelegte

Strecke, welche manuell gemessen wurde zur Richtungszuweisung mithilfe der Signatur verwendet, ergeben sich bereits durch geringe Messungenauigkeiten enorme Richtungsfehler – insbesondere bei kleinen Geschwindigkeiten (Rot).



*Abb. 6-6: Darstellung der Richtungsfehler, die sich durch die Pfeilsignatur ergeben*

Aufgrund der vorstehenden Gründe wird im Zuge der Einzeldarstellung der Fahrzeuge ein Punktsymbol gewählt. Dabei wird jedes Fahrzeug durch einen farbigen Kreis repräsentiert und sorgt somit für ein deutlich harmonischeres Erscheinungsbild. Zur Aufbereitung der Vektordaten mithilfe von OCAD werden die Daten in das Grafikprogramm übernommen.

Folgende Darstellung ergibt sich daraus:



Abb. 6-7: Darstellung der Fahrzeuggeschwindigkeiten durch Kreissignatur Kreuzung A99 Dachauerstraße in München-Nord

Nachfolgend werden Ausschnitte der Geschwindigkeitskarte vergrößert gezeigt und die dargestellte Verkehrssituation mithilfe der in Abb. 6-3 und Abb. 6-4 dargestellten Legenden interpretiert. Zur Darstellung wurden die Pfeilsignaturen gewählt, um zusätzliche Aussagen über die Fahrtrichtung treffen zu können.

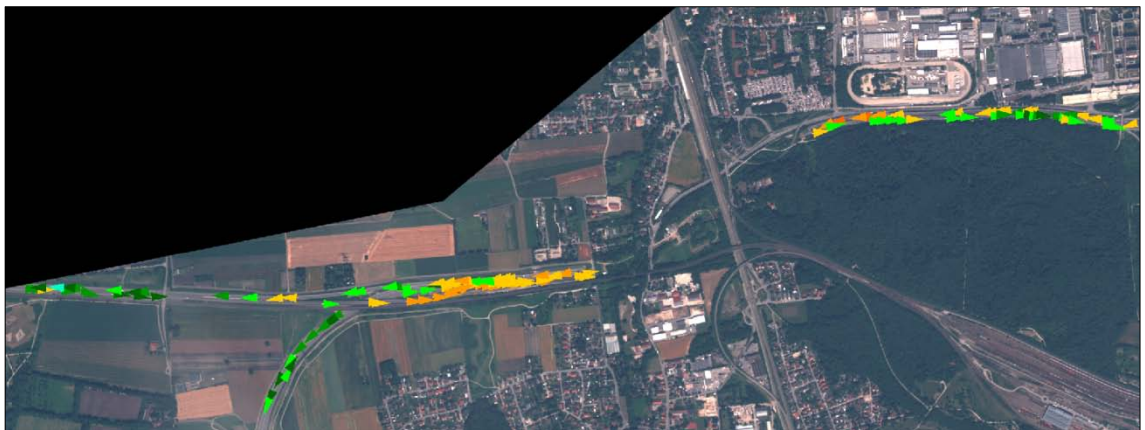


Abb. 6-8: Fahrzeuggeschwindigkeiten vor und nach dem Allacher Tunnel

Der in Abb. 6-8 gezeigte Ausschnitt des Allacher Tunnels zeigt, dass zur Zeit der WV-2-Aufnahme die Ein- bzw. Ausfahrt westlich des Tunnels die Fahrzeuge mit Geschwindigkeiten zwischen  $40 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  und  $60 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  fuhren und dass dort ein erhöhtes Verkehrs-



aufkommen herrschte. Auf der Ostseite zeigt der Fahrstreifen, welcher in den Tunnel führt eine ähnliche Situation. Fahrzeuge, welche aus dem Tunnel fahren, zeigen Geschwindigkeiten ab  $80 \frac{km}{h}$  und eine geringere Fahrzeugdichte.



Abb. 6-9: Fahrzeuggeschwindigkeiten innerhalb des Ausschnitts Autobahnkreuz A99 mit A8

Die vorstehende Abb. 6-9 zeigt das Verkehrsgeschehen innerhalb des Autobahnkreuzes A99 mit A8. Die Fahrzeuge auf der A8, westlich des Autobahnkreuzes fahren alle mit einer Mindestgeschwindigkeit von 80km/h. Bei dem in dunkelrot dargestellten Fahrzeug handelt es sich um eine Fehlmessung. Bei den Fahrzeugen östlich des Autobahnkreuzes ist festzustellen, dass die Geschwindigkeiten langsamer werden, je näher die

Autobahnende ist. Hier ist eine Anhäufung dunkelroter Pfeile zu erkennen, die auf eine Staubildung hindeuten.

Weiter kann dem Bild entnommen werden, dass die Fahrzeuge auf der A99 mit einer Mindestgeschwindigkeit von 60 km/h unterwegs sind, dabei ist festzustellen, dass sich vor der Einfahrt des Aubinger Tunnels Richtung Südwesten ( linke untere Ecke) die Geschwindigkeit der einzelnen Fahrzeuge verringert und die Verkehrsdichte zunimmt. Daraus kann geschlossen werden, dass innerhalb des Tunnels zähfließender Verkehr herrscht.



Abb. 6-10: Fahrzeuggeschwindigkeiten auf der A96 in Richtung Ausfahrt Garmischer Straße

Die Fahrzeuge westlich der Fürstenriederstraße (Nord-Süd verlaufende Straße in Bildmitte) waren mit mindestens  $60 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  unterwegs. Die Ausfahrt der A96 auf die Garmischer Straße zeigt, dass die Fahrzeuge mit extrem verminderten Geschwindigkeiten fuhren und teils sogar standen. Auch Richtung Süden blieben die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge auf der Garmischer Straße vermindert. Grund für diese Staubildung ist die Baustelle Luise-Kiesselbach-Platz.

### 6.5 Vergleich mit ADAC

Einige Anbieter interaktiver Karten wie Google Maps oder der ADAC Maps bieten neben den Standardfunktionen (z.B. Routenplanung, Point of Interest) die Möglichkeit zur Anzeige des aktuellen Verkehrsflusses von einem beliebig ausgewählten Stadtbereich. Zur Analyse des innerhalb dieser Arbeit angefertigten Verkehrsgeschehens wurde zum Vergleich eine Karte des ADAC herangezogen, die ebenfalls die Verkehrslage darstellt. Da der ADAC langjährige Erfahrungen in aktuellen Verkehrsmeldungen hat und sehr präzise Daten verschiedener Quellen (Polizei, Autobahnbrücken, Sensorschleifen, Fahrzeuge mit GPS und Mobiltelefone) verwendet, wurde diese als Orientierung verwendet. Die Verkehrslage vom Montag, den 20.07.2010 (10:30 Uhr GMT) stand jedoch nicht mehr zur Verfügung, daher musste eine Karte von einem vergleichbaren Tag verwendet werden. Es wurde die zu erwartende Verkehrslage für Montag, den 14.07.2014 um 12:30 Uhr MESZ herangezogen, da es sich dabei auch um einen „normalen“ Werktag, die gleiche Jahreszeit und Tageszeit handelt (Abb. 6-11). Da die zu erwartenden Verkehrslagen auf den gefahrenen Durchschnittsgeschwindigkeiten der letzten Tage, Wochen und Monate basieren und sowohl Ferienbeginn und Feiertage in die Vorhersage mit einbezogen werden, sind diese relativ genau (persönliche Kommunikation mit Herrn Bachleitner, Mitarbeiter des ADAC, 2013 ).

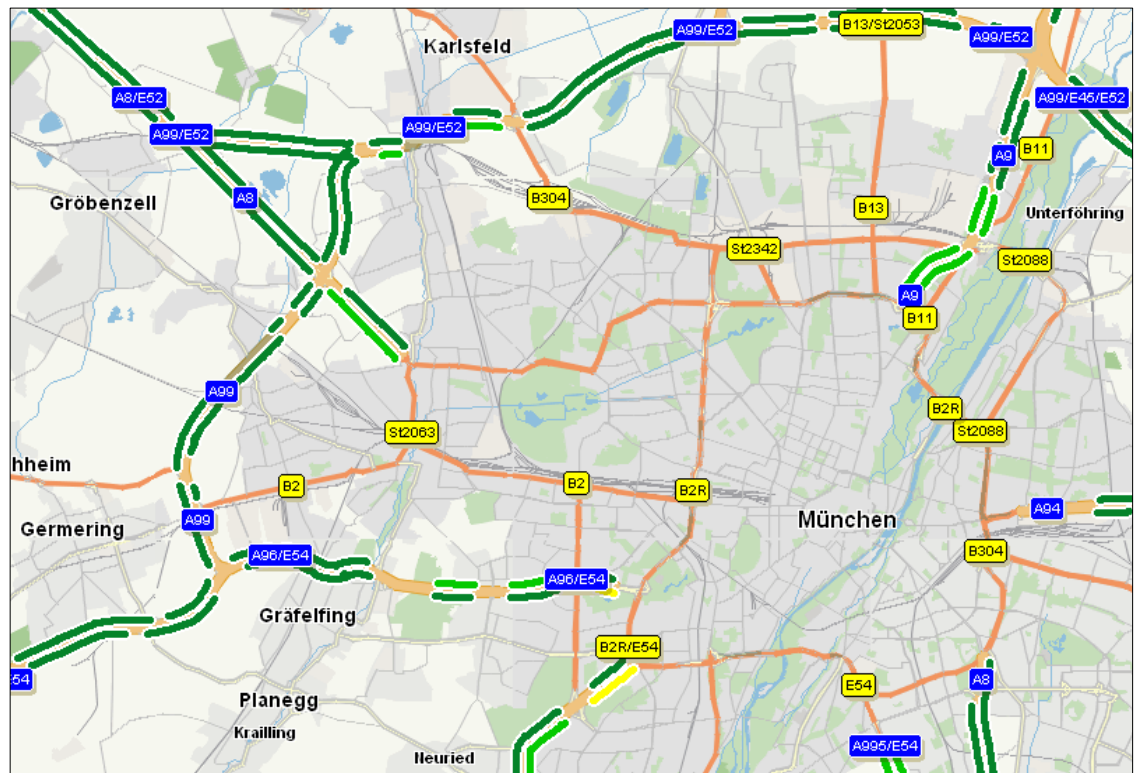


Abb. 6-11: Zu erwartende Verkehrslage am 14.07.2014 um 12:30 Uhr MESZ (ADAC, 2013)

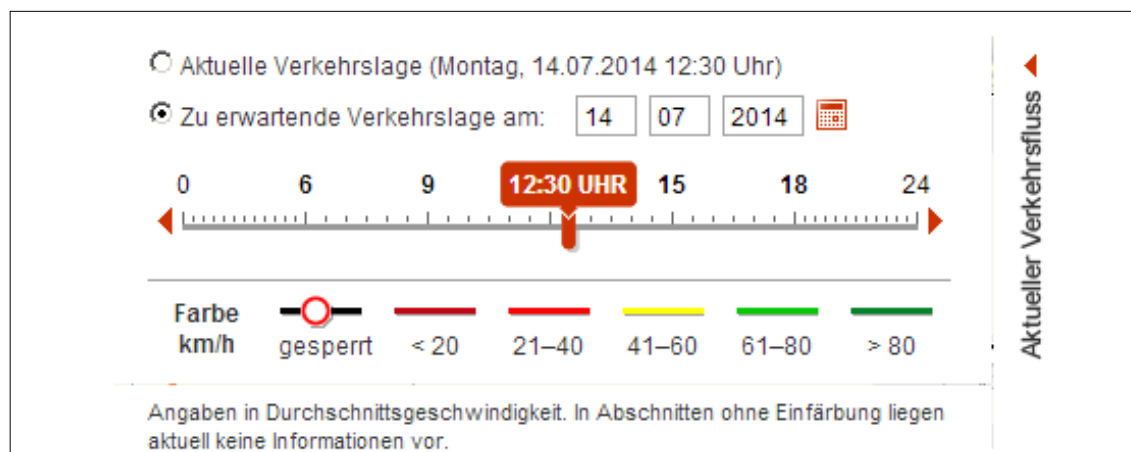


Abb. 6-12: Legende der zu erwartenden Verkehrslage am 14.07.2014 um 12:30 Uhr MESZ (ADAC, 2013)

Die Karte des ADAC gibt lediglich den Verkehrsfluss auf den Autobahnen wieder. Im Vergleich zu den aus der MS1 WV-2-Aufnahme abgeleiteten Verkehrsflüssen, ist festzustellen, dass die ermittelten Durchschnittsgeschwindigkeiten der Fahrzeuge auf den Autobahnen deckungsgleich zu den vom ADAC berechneten Geschwindigkeiten sind.

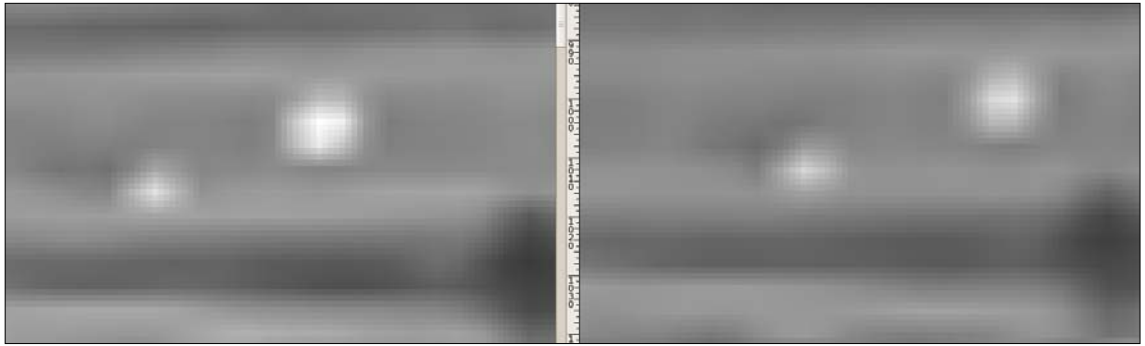


---

## 7 Grenzen der manuellen Messung

---

Da die Fahrzeuge in den Satellitenbildern mit einer Pixelauflösung von 2 m kaum signifikante Strukturen aufweisen, sondern nur verschwommen erkennbar sind, wird die Fahrzeugerkennung deutlich erschwert. Die Passkreuze der Messungen werden jeweils mittig auf den Fahrzeugen platziert; dabei ist anzumerken, dass die Fahrzeuge innerhalb der Kanäle unterschiedlich reflektieren und daher andere Strukturen aufweisen können.



*Abb. 7-1: Fahrzeugreflexionen in 1r und 1g interpolierte Darstellung*

Auf innerstädtischen Straßen ist durch die geringe Fahrstreifenbreite häufig keine Trennung der Fahrbahnen möglich. Auch parkende Fahrzeuge werden teilweise fälschlicherweise vermessen. Zur Vermeidung dieser Probleme werden deshalb ständige Distanz- und Richtungsüberprüfungen durchgeführt, die sich als sehr zeitintensiv erweisen. In Fällen, in denen nicht erkennbar ist, ob die Fahrbahn in nur eine oder zwei Richtungen verläuft, kann Google Maps zur Hilfe genommen werden.

Ebenfalls als schwierig erweist sich die Messung von Fahrzeugen, die sich innerhalb einer Kreuzung befanden. Häufig kann nur über einen Koordinatenvergleich festgestellt werden, ob die Fahrzeuge in horizontaler oder vertikaler Richtung unterwegs waren, da es anhand der Pixelstruktur nicht erkennbar war, weil viele Fahrzeuge innerhalb des Satellitenbildes nur als Quadrate wiedergegeben wurden.

Dunkle Fahrzeuge, welche sich vom Straßenbelag zu wenig abheben, können in die Auswertung nicht mit einbezogen werden. Zusätzlich gibt es neben den auflösungsbe-

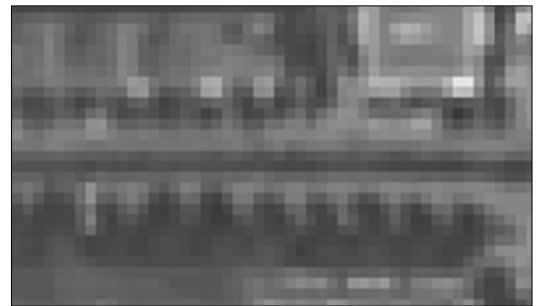


dingten Problemen noch weitere verkehrsbedingte Faktoren, die die Messungen erschweren.

Da Fahrzeuge häufig in Gruppen auftreten, ist die Markierung der Einzelfahrzeuge nicht immer leicht. Zudem wird dadurch die Unterscheidung von Fahrzeugen zu anderen Objekten deutlich erschwert. In eng bebauten Stadtgebieten wird durch den Schattenwurf von Häusern und Bäumen teilweise die Fahrbahn verdeckt. Dies hat zur Folge, dass das Erkennen und die Erfassung der Fahrzeuge zusätzlich beeinträchtigt werden.



*Abb. 7-2: Fahrzeug mittig auf einer Kreuzung*



*Abb. 7-3: Fahrbahnverdeckung durch Bäume*

---

## 8 Zusammenfassung

---

Da sich die Darstellung der Fahrzeuge aufgrund unterschiedlicher Reflexion der Kanäle (Rot und Gelb) verändert, die Fahrzeuge keine markanten Strukturen aufwiesen und die Erfassung nur von der visuellen Wahrnehmung und Interpretation des Betrachters abhängig ist, erweist sich die manuelle Fahrzeuergfassung als keine optimale Methode für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen.

Anhand der relativ geringen Standardabweichung, welche aus zwei unabhängigen Messreihen für München und London berechnet wurde, wird jedoch deutlich, dass die Fahrzeugmessungen sehr exakt durchgeführt wurden. Auch der geringe Unterschied von 0,00259 s zwischen den kalibrierten Zeitdifferenzen  $\Delta t$  der beiden Testgebiete spricht für ein hohes Maß an Genauigkeit. Das Ergebnis liegt nahe an der von Smiley (2013) ermittelten Zeitdifferenz und ist damit als brauchbar zu beurteilen.

Die mithilfe der kalibrierten Zeitdifferenz von München berechneten Geschwindigkeiten der Fahrzeuge sind realistisch und auch der visualisierte Verkehrsfluss gibt ein wahres Verkehrsgeschehen wieder. Dennoch stützen sich auch diese Ergebnisse auf manuelle Messungen; zudem ist der Segmentierungsvorgang der Straßenabschnitte, die anhand der mittleren Geschwindigkeiten der beteiligten Fahrzeuge eingefärbt werden, sehr zeitintensiv und umständlich. Da die Darstellung der Fahrzeuggeschwindigkeiten der einzelnen Fahrzeuge mittels farbiger Kreissignatur, welche direkt auf dem jeweiligen Fahrzeug platziert wurde, erfolgt überlagern sich die Signaturen häufig. Dadurch wird die Lesbarkeit beeinträchtigt, da die einzelnen Fahrzeuge nicht mehr identifiziert werden können. Für eine saubere kartographische Arbeit müssten die Überlagerungen vermieden werden.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass das Ergebnis der Kalibrierung der Zeitdifferenz  $\Delta t = 0,283$  s sehr gut ist und für weitere Anwendungen bei WV-2-Satellitenbildern unverändert verwendet werden kann.

---

## 9 Ausblick

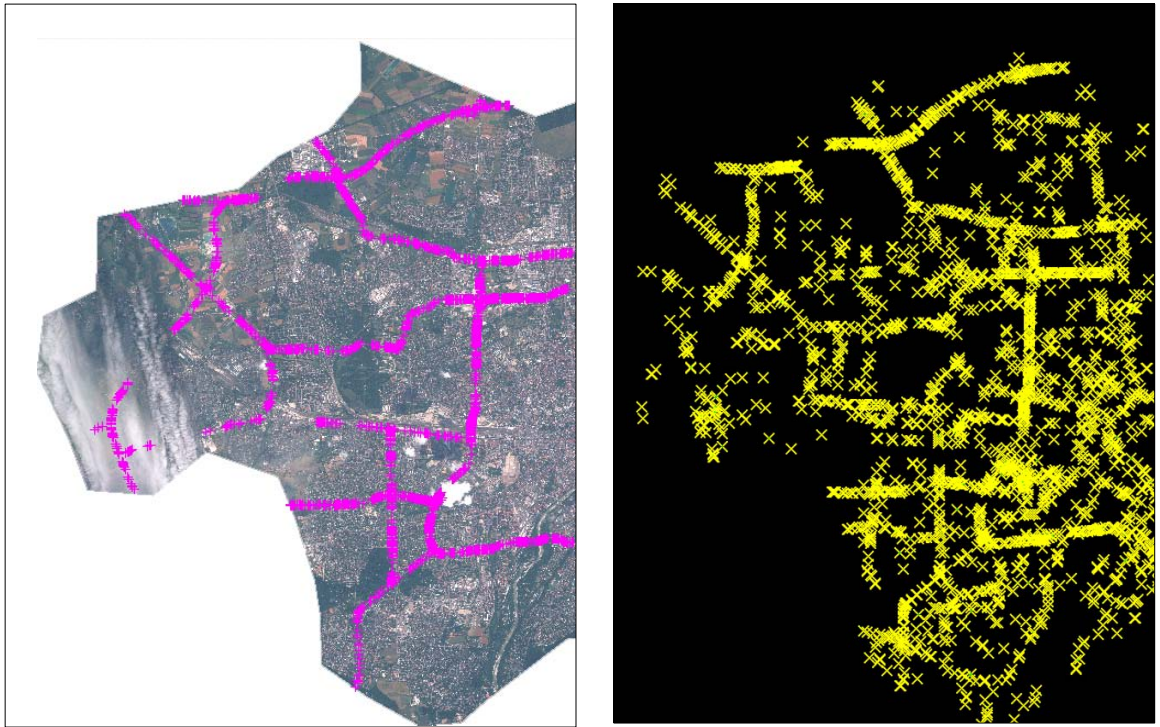
---

Im Hinblick auf die Entwicklung eines automatischen Detektors zur Erkennung von bewegten Fahrzeugen, ist die bekannte Zeitdifferenz zwischen den zwei MS-Arrays enorm wichtig. Durch die Tatsache, dass damit die automatische Erfassung von Fahrzeugen aus nur einem Satellitenbild und ohne Verwendung einer Straßendatenbank ermöglicht wird, eröffnet sich ein neuer Anwendungsbereich für WorldView-2-Aufnahmen. Neben dem Einsatz zur Unterstützung von herkömmlichen Systemen in der Verkehrsplanung und -überwachung besteht die Möglichkeit, unter Verwendung eines solchen Detektors die Validierung bestehender und Generierung neuer OSM-Datenbanken durchzuführen. Gerade in abgelegenen Regionen wie beispielsweise im Outback Australiens, in welchen noch keine Straßendatenbank vorhanden ist, kann mithilfe der automatisch erfassten Fahrzeuge auf Straßen geschlossen werden, deren Straßenverlauf daraus grob abgeleitet werden kann.

Ein möglicher Detektor wurde von Krauss et. al (2013) beschrieben. Die Markierung bewegter Objekte erfolgt hier mithilfe von Differenzbildern (siehe Abb. 9-1).



Abb. 9-1: Differenzbild bewegte Objekte in der MSI-WV-Aufnahme (persönliches Gespräch mit Herrn Krauß (2013))



*Abb. 9-2: Fahrzeugmarkierungen des automatischen Detektors innerhalb der MS1-WV-Aufnahme im Vergleich zu den manuellen Messungen nach Abb. 6-1 (Krauß, persönliches Gespräch (2013))*

Die erste Anwendung des automatischen Verfahrens auf die hier vorgestellte WV-2-Szene liefert bereits sehr gute Ergebnisse wie Abb. 9-2 zeigt.

Durch die automatisch erfassten Fahrzeuge wird das Straßennetz sichtbar. Im Vergleich zu den 2313 manuell erfassten Fahrzeugen auf den Hauptverkehrsadern wurden mithilfe des Detektors insgesamt 3087 bewegte Objekte im MS1-Bild von München erkannt.

Im Weiteren soll dieser automatische Detektor durch die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit validiert werden. Damit wäre ein Verfahren geschaffen, zukünftig Verkehrsdaten aus WorldView-2-Satellitenszenen automatisch, schnell und präzise zu erfassen. Diese Methode kann auch auf andere Erdbeobachtungssatelliten wie z. B. RapidEye oder Pléiades ausgedehnt werden.

---

Literaturverzeichnis

---

**ADAC, 2013.** *ADAC Maps*.

[Zitat vom: 15. 12. 2013.]

<http://maps.adac.de/>

**Ahrens, G. 2011.** Zukunft von Mobilität und Verkehr. *TU-Dresden*.

[Online] 08. 2011. [Zitat vom: 15. 12. 2013.]

[www.tu-dresden.de/srv/](http://www.tu-dresden.de/srv/).

**Bodechtel, J. und Gierloff-Emden, H. 1974.** *Weltraumbilder, die dritte Entdeckung der Erde*. Leinen : List Paul Verlag, 1974. ISBN:9783471776257.

**Boltze, M.; Wolfermann, A.; Schäfer, P. 2005.** Leitfaden Verkehrstelematik Hinweise zur Planung und Nutzung in Kommunen und Kreisen. *Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen*.

[Online] 06. 2005. [Zitat vom: 15. 12. 2013.]

[www.bmvbs.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/leitfaden-verkehrstelematik.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bmvbs.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/leitfaden-verkehrstelematik.pdf?__blob=publicationFile).

**DigitalGlobe, 2010.** Radiometric Use of WorldView-2 Imagery.

[Online] 01. 11. 2010. [Zitat vom: 15. 12. 2013.]

[http://www.digitalglobe.com/sites/default/files/Radiometric\\_Use\\_of\\_WorldView-2\\_Imagery%20\(1\).pdf](http://www.digitalglobe.com/sites/default/files/Radiometric_Use_of_WorldView-2_Imagery%20(1).pdf).

**DLR, 2013.** Raumfahrtmanagement.

[Online] 2013. [Zitat vom: 15. 12. 2013.]

[http://www.dlr.de/blogs/desktopdefault.aspx/tabid-5919/9754\\_read-348/](http://www.dlr.de/blogs/desktopdefault.aspx/tabid-5919/9754_read-348/).

**ESA, 2013.** eoPortal Directory.

[Online] 2013. [Zitat vom: 15. 12. 2013.]

<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/v-w-x-y-z/worldview-2>.

**Etaya, M.; Sakata, T.; Shimoda, H; Matsumae, Y. 2004.** An experiment on detecting moving objekts using a single scene of QuickBird data.

*Journal of the Remote Sensing Society of Japan*. 24 (4) S. 357-366, 2004.

**GoogleMaps, 2013.** Google Maps.

[Online] 24. 06. 2013. [Zitat vom: 15. 12. 2013.] <https://maps.google.de/>.

**Hinz, S. und Stilla, U. 2006.** Car detection in aerial thermal images by local and global evidence accumulation.

*Pattern Recognition. Letters* Vol. 27, No 4, 03. 2006, S. 308-315.

**Hütter, A. 2013.** Statistisches Bundesamt, Wiesbaden: *Verkehr auf einen Blick*.

[Online] 2013. [Zitat vom: 15. 12 2013.]

[https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/TransportVerkehr/Querschnitt/BroschuereVerkehrBlick0080006139004.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/TransportVerkehr/Querschnitt/BroschuereVerkehrBlick0080006139004.pdf?__blob=publicationFile).

**Infosatellites, 2012.** Satellite Tracking, Prediction and Informations about Objects in the Sky.

[Online] 2012. [Zitat vom: 15. 12. 2013.]

<http://www.infosatellites.com/worldview2-satellite-information-norad-35946.html>.

**Kääb, A. 2011.** Vehicle velocity from WorldView-2 satellite imagery. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Society (GRSS)*. 2011, S. 4.

**Kauderer, A. 2011.** Human space flight.

[Online] 23.. 09. 2011. [Zitat vom: 15. 12. 2013.]

[http://spaceflight.nasa.gov/realdata/sightings/SSApplications/Post/JavaSSOP/SSOP\\_Help/tle\\_def.html](http://spaceflight.nasa.gov/realdata/sightings/SSApplications/Post/JavaSSOP/SSOP_Help/tle_def.html).

**Krauß, T.; Stätter, R.; Philipp, R.; Bräuninger, S. 2013.** Traffic flow estimation from single satellite images. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Volume XL-1/W3, S.241-246, SMPR.

**Kronberg, P. 1985.** *Fernerkundung der Erde*. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag.

**Leitloff, J, Hinz, S und Stilla, U. 2004.** Vehicle queue detection in complex urban areas by extraction and analysis of linear features.

**Leitloff, J., Hinz, S. und Stilla, U. 2010.** Vehicle detection in very high resolution satellite images of city areas.

*IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, VOL. 48, NO.7.* 07 2010, S. 2795-2806.

**Marchesi, A., et al. 2012.** *The 33rd Asian Convergence on Remote Sensing.*

Pattaya, Thailand : s.n., 2012.

**Mitte, M. und Unger, R. 2013.** DARC-Ortsverband W 34: Universität Halle.

[Online] 17. 04. 2013. [Zitat vom: 15. 12. 2013.]

<http://www.amateurradio.uni-halle.de/sat/kepler.de.html>.

**mr-kartographie. 2010.** [Online] mr-kartographie Ingenieurbüro und Verlag.

[Zitat vom: 15. 12 2013.]

<http://www.mr-kartographie.de/startseite.html>.

**n2yo. 2013.** Real time satellite tracking.

[Online] 2013. [Zitat vom: 15. 12. 2013.]

<http://www.n2yo.com/?s=37375>.

**OCAD.** OCAD-the smart software for cartography.

[Online] [Zitat vom: 15. 12. 2013.]

<http://www.ocad.com/de/>.

**Smiley, B. 2011.** Geolocation accuracy topics relevant to DigitalGlobes satellite

constellation. [Online] 08. 04. 2011.

**Stadler, R. 2011.** *Der Tagesspiegel*. [Befragte Person] Moritz Honert.

Der Tagesspiegel, 13. 05. 2011.

**Stilla, U.; Michaelsen, E.; Soergel, U.; Hinz, S.; Ender, J. 2004.** Airborne monitoring of vehicle activity in urban areas. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatioal Inform Sci., Vol. 34, no. Part B.* 2004, S. 973-979.

**Tao, J. und Yu, W. 2011.** [Online] 2011. [Zitat vom: 15. 12. 2013.]

[http://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=0CD0QFjAC&url=http%3A%2F%2Fcalval.cr.usgs.gov%2FJACIE\\_files%2FJACIE11%2FPresentations%2FWedPM%2F315\\_Tao\\_JACIE\\_11.137.pdf&ei=vgj2UZjaL8jRtQa1p4CIDQ&usg=AFQjCNFzx6gvsmQzDkX5z8jdZ9qVyddlLg&bvm](http://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=0CD0QFjAC&url=http%3A%2F%2Fcalval.cr.usgs.gov%2FJACIE_files%2FJACIE11%2FPresentations%2FWedPM%2F315_Tao_JACIE_11.137.pdf&ei=vgj2UZjaL8jRtQa1p4CIDQ&usg=AFQjCNFzx6gvsmQzDkX5z8jdZ9qVyddlLg&bvm).

**Tao, J. und Yu, W. 2011.** A preliminary study on imaging time difference among bands of WorldView-2 and its potential applications. *IEEE*. 2011, S. 198-200.

**Zhen, X. und Yun, Z. 2008.** An Initial Study on Vehicle Information Extraction from Single Pass QuickBird Satellite Imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing Vol. 74, No 11.* 11 2008, S. 1401-1411.



---

Anhang

---

Auf der beiliegenden CD befinden sich alle Excel-Dateien die zur Kalibrierung verwendet wurden. In den nachfolgenden Tabellen wird der Aufbau der zur Auswertung verwendeten Tabellen gezeigt. Insgesamt wurden die Auswertungen für folgende Messungen durchgeführt:

<i>Testgebiet</i>	<i>Fahrzeugmessungen innerhalb der Bilder:</i>			<i>Fahrzeugmessungen zwischen den Bildern:</i>		
München MS	1r-1g	2r-2g	3g-3r	1r-3g	1r-2r	2r-3g
London MS	1r-1g	2g-2r	3r-3g	1r-3r	1r-2g	2g-3r

<i>Testgebiet</i>	<i>Fahrzeugmessungen innerhalb der Bilder:</i>			<i>Fahrzeugmessungen zwischen den Bildern:</i>		
München PAN	1r-1PAN	1PAN-1g	2g-2PAN	2g-2PAN	3r-3PAN	3PAN-3g
London PAN	1r-1PAN	1PAN-1g	2r-2PAN	2PAN-2g	3g-3PAN	3PAN-3r

Hier wurden ausschließlich die Auswertungen der Fahrzeuge des Testgebiets München von MS1r zu MS3g (siehe Tab. 0-1), MS1r zu MS1g (siehe Tab. 0-2), die Tabelle der Standardabweichungen die aus dem Vergleich von zwei Messreihen berechnet wurde (siehe Tab. 0-4) und die Ermittlung von  $\Delta t$  gezeigt (siehe Tab. 0-3).

Bild 1 nach  
3

Bild	[h]	[min]	[s]	First Line Time [s]	Differenzen [s]
1	10	29	57,79	37797,79	
2	10	30	16,59	37816,59	18,7991890
3	10	30	40,39	37840,39	23,7999810

Bildhöhe [Pixel]	delta_t_1 [s]
9715	0,00033333

		Kanal														
		Rot		Gelb												
Autobahn	Punkt Nr.	x1	y1	x3	y3	delta_x	delta_y	t1 [s]	t3 [s]	delta_t 1-3 [s]	S_1-3 [pixel]	S_1-3 [m]	v [pi- xel/s]	v [km/h]	t [s]	Ausreißer
A99	1	1069,47	751,55	1621,51	694,02	552,04	57,53	37798,04	37843,4	45,36	555,03	1110,06	12,24	88,11	0,29	
	2	991,51	765,49	1548,51	698,01	557	67,48	37798,05	37843,4	45,35	561,07	1122,15	12,37	89,08	0,28	
	3	951,01	774,07	1485,49	702,51	534,48	71,56	37798,05	37843,4	45,35	539,25	1078,5	11,89	85,62	0,3	
	4	318,49	990,02	832,49	801,02	514	189	37798,12	37843,36	45,24	547,65	1095,29	12,11	87,16	0,27	
	5	278,51	1009,51	765,51	820,01	487	189,5	37798,13	37843,36	45,23	522,57	1045,14	11,55	83,19	0,27	
	6	239,49	1029,51	743,49	826,51	504	203	37798,14	37843,35	45,22	543,35	1086,69	12,02	86,51	0,26	x
	7	220,99	1039,04	696,49	841,51	475,5	197,53	37798,14	37843,35	45,21	514,9	1029,79	11,39	82	0,28	
	8	123,52	1095,04	581,51	879,5	457,99	215,54	37798,16	37843,34	45,18	506,17	1012,35	11,2	80,67	0,28	
	9	108,5	1104,5	574,5	886,5	466	218	37798,16	37843,33	45,17	514,47	1028,94	11,39	82	0,32	x
	10	81,51	1120,48	550,51	890,48	469	230	37798,17	37843,33	45,17	522,36	1044,72	11,57	83,27	0,31	x
	11	1327,51	706,04	794,04	800,02	533,47	93,98	37798,03	37843,36	45,34	541,68	1083,37	11,95	86,03	0,3	
	12	1108,52	732,44	591,5	863,51	517,02	131,07	37798,04	37843,34	45,31	533,38	1066,75	11,77	84,76	0,26	x
	13	1043,51	743,49	540,01	882,01	503,5	138,52	37798,04	37843,34	45,3	522,21	1044,41	11,53	83,01	0,27	
	14	1038,51	744,5	535,51	883,5	503	139	37798,04	37843,34	45,29	521,85	1043,7	11,52	82,95	0,27	

Tab. 0-1: Messungen von Bild 1r nach 3g und Bestimmung der Verkehrsparameter

*In Bild 1*

<i>Bild</i>	<i>[h]</i>	<i>[min]</i>	<i>[s]</i>	<i>First Line Time [s]</i>	<i>Differenzen [s]</i>
1	10	29	57,79	37797,79	
2	10	30	16,59	37816,59	18,7991890
3	10	30	40,39	37840,39	23,7999810

<i>Bildhöhe [Pixel]</i>	<i>delta_t 1 [s]</i>
9715	0,00033333

<i>Autobahn</i>		<i>Punkt Nr.</i>		<i>Kanal</i>				<i>delta_x</i>	<i>delta_y</i>	<i>S_1-1 [pixel]</i>	<i>S_1-1 [m]</i>
				<i>Rot</i>		<i>Gelb</i>					
<i>x1</i>	<i>y1</i>	<i>x1</i>	<i>y1</i>								

<i>A99</i>	1	1069,47	751,55	1072,99	751,02	3,52	0,53	3,56	7,12
	2	991,51	765,49	995,02	765	3,51	0,49	3,54	7,09
	3	951,01	774,07	954,5	773,51	3,49	0,56	3,53	7,07
	4	318,49	990,02	321,51	988,5	3,02	1,52	3,38	6,76
	5	278,52	1009,51	281,52	1008,51	3	1	3,16	6,32
	6	239,49	1029,51	242,49	1028,51	3	1	3,16	6,32
	7	220,99	1039,04	223,99	1038,04	3	1	3,16	6,32
	8	123,52	1095,04	126,52	1094,04	3	1	3,16	6,32
	9	108,5	1104,5	111,5	1102,5	3	2	3,61	7,21
	10	81,52	1120,48	84,52	1118,48	3	2	3,61	7,21
	11	1327,51	706,04	1324,04	706,04	3,47	0	3,47	6,94
	12	1108,52	732,44	1105,51	732,49	3,01	0,05	3,01	6,02
	13	1043,51	743,49	1040,51	744,5	3	1,01	3,17	6,33
	14	1038,51	744,5	1035,51	745,51	3	1,01	3,17	6,33

Tab. 0-2: Messungen von Bild 1r nach 1g und Bestimmung der zurückgelegten Strecken

Autobahn	Punkt Nr.	S [m]			Mittel von S [m], wenn Bedingung erfüllt		
		Bild 1-1	Bild 2-2	Bild 3-3	Bild 1-2	Bild 2-3	Bild 1-3
A99	1	7,12	7,11	7,04	7,12	7,08	7,08
	2	7,09	7,04	7	7,06	7,02	7,04
	3	7,07	7,07	7	7,07	7,03	7,03
	4	6,76	6,32	6,32	6,54	6,32	6,54
	5	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32
	6	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32
	7	6,32	6,32	6,6	6,32	6,46	6,46
	8	6,32	6,72	6,34	6,52	6,53	6,33
	9	7,21	6,72	7,3	6,96		7,26
	10	7,21	7,51	7,03	7,36	7,27	7,12
	11	6,94	7,27	7,35	7,11	7,31	7,14
	12	6,02	6,36	6,32	6,19	6,34	6,17
	13	6,33	6,34	6,29	6,33	6,32	6,31
	14	6,33	6,32	6,32	6,33	6,32	6,33

Bedingung für S [m]	
Zulässige Abweichung [m]	0,5

Standardabweichung tRot-Gelb [s]	0,017626
----------------------------------	----------

Mittel tRot-Gelb [s]	0,28289
----------------------	---------

Tab. 0-3: Mittelwertbildung der Strecken innerhalb der Bilder und Auswertung der Messungen mit Mittelwertbildung von  $\Delta t$

		1. Messreihe					2. Messreihe					Standardabweichungen s [px]			
		Rot		Gelb			Rot		Gelb			Rot		Gelb	
		xI	yI	xI	yI		xI	yI	xI	yI		xI	yI	xI	yI
Autobahn	Punkt Nr.	xI	yI	xI	yI		xI	yI	xI	yI		xI	yI	xI	yI
A99	1	1069,47	751,55	1072,99	751,02		1069,51	751,53	1073,02	751,01		0,03	0,01	0,02	0,01
	2	991,51	765,49	995,02	765		991,51	765,49	995,05	765,02		0	0	0,02	0,01
	3	951,01	774,07	954,5	773,51		950,52	774,47	954,53	773,49		0,35	0,28	0,02	0,01
	4	318,49	990,02	321,51	988,5		318,05	989,99	321,51	988,51		0,31	0,02	0	0,01
	5	278,52	1009,51	281,52	1008,51		278,51	1009,51	281,51	1008,49		0,01	0	0,01	0,01
	6	239,49	1029,51	242,49	1028,51		239,49	1029,51	242,51	1028,49		0	0	0,01	0,01
	7	220,99	1039,04	223,99	1038,04		220,99	1039,04	224,05	1038,07		0	0	0,04	0,02
	8	123,52	1095,04	126,52	1094,04		123,02	1094,99	126,01	1093,52		0,35	0,04	0,36	0,37
	9	108,5	1104,5	111,5	1102,5		109,02	1104,01	111,54	1102,51		0,37	0,35	0,03	0,01
	10	81,52	1120,48	84,52	1118,48		81,02	1120,99	84,08	1119,01		0,35	0,36	0,31	0,37
	11	1327,51	706,04	1324,04	706,04		1327,51	706,04	1324,51	706,04		0	0	0,33	0
	12	1108,52	732,44	1105,51	732,49		1108,52	732,44	1105,45	732,84		0	0	0,04	0,25
	13	1043,51	743,49	1040,51	744,5		1043,51	743,49	1040,51	744,49		0	0	0	0,01
	14	1038,51	744,5	1035,51	745,51		1038,51	744,5	1035,51	745,5		0	0	0	0,01

Mittelwert  $s$  [px] 0,09

Tab. 0-4: Ermittlung der Standardabweichung anhand von zwei Messreihen

---

## Danksagung

---

Zunächst möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Bachelorarbeit unterstützt und motiviert haben.

Danken möchte ich Herrn Prof. Dr. Reiner Buzin für die unkomplizierte Betreuung von Seiten der Hochschule.

In gleichem Maße gilt mein Dank Herrn Thomas Krauß und Herrn Rolf Stätter, meinen beiden Betreuern vom DLR. Für ihre ausgiebige Unterstützung, konstruktive Kritik und für die zahlreichen Stunden der Korrekturlesung möchte ich ihnen danken.

Weiterhin bedanke ich mich bei Frau Dr. Danielle Hoja vom DLR, die stets ein offenes Ohr für Fragen hatte, bei Herrn Marius Röder und Herrn Robert Philipp für ihre tatkräftige Unterstützung.

Zu guter Letzt, jedoch nicht weniger möchte ich natürlich auch meinen Eltern von Herzen danken, da Sie mir das Studium erst ermöglicht haben. An dieser Stelle möchte ich ganz besonders meinem Vater dafür danken, dass er mich dazu ermuntert hat überhaupt ein Studium zu beginnen, auch wenn es ihm leider nicht mehr vergönnt war meinen Abschluss mitzerleben, ist es zu einem großen Teil sein Verdienst, dass es diese Arbeit gibt.

Sarah, Bräuninger  
(Vorname, Name)

Otterfing, den 20.12.2013  
(Ort, Datum)

02.01.1990  
(Geburtsdatum)

9A  
(Studiengruppe)

WS 2013/2014  
(Semester)

### **ERKLÄRUNG**

gemäß § 35 Abs. 7 RaPO

Hiermit erkläre ich, dass ich die Bachelorarbeit selbständig verfasst, noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel benutzt, sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe.

\_\_\_\_\_  
(Unterschrift)